

---

# A INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO NÚCLEO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ESTRUTURAS SANDWICH COM NÚCLEO EM ESPUMA METÁLICA

---

Sérgio André Ramalho Guedes

Orientador:

Renato Manuel Natal Jorge

Dissertação para grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Porto, 2017



*"If I have seen further, it is by standing on the shoulders of giants."*

*Sir Isaac Newton (1643 - 1727)*



## AGRADECIMENTOS

Antes de mais, gostaria de mostrar toda a gratidão à minha família que sempre me apoio ao longo de todo o curso, mesmo com grande esforço e sacrifício.

De uma maneira especial, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Renato Natal Jorge por todo o apoio que me deu. Especialmente pela oportunidade que me deu de realizar um trabalho que já vinha a ser desenvolvido pela FEUP desde 2008. Pela disponibilidade proporcionada e pelos documentos facultados agradeço ao meu Orientador em primeiro lugar.

Gostaria também de agradecer ao Doutor Marco Parente pela ajuda nas simulações numéricas e pela a sua disponibilidade apresentada ao longo do semestre.

Não poderia deixar de agradecer a todos os meus colegas que me acompanharam ao longo destes anos e me ajudaram a ultrapassar todas as dificuldades encontradas. Entre outros, um especial obrigado para o Rafael Machado que me ajudou a concluir a especialização em Projecto e Construção Mecânica.

Por fim queria agradecer aos meus dois irmãos que me auxiliaram nesta longa caminhada. Uma agradecimento singular para o meu irmão Carlos Guedes pelo auxilio na organização desta tese.

*Sérgio Guedes (Porto, 2017)*



## RESUMO

Podemos encontrar estruturas *sandwich* nas mais diversas áreas da engenharia. Desde cedo se percebeu que a combinação de vários materiais, de maneira a formar uma *sandwich*, oferecia uma combinação das propriedades dos mesmos. Assim sendo, para aplicações mais exigentes do ponto de vista mecânico, a utilização deste tipo de estruturas passa a ser uma ferramenta muito válida.

Combinando as propriedades de chapas de alumínio (as faces da estrutura *sandwich*) com as propriedades da espuma metálica (núcleo) podemos obter uma estrutura extremamente leve e resistente. A resistência das chapas de alumínio é a principal origem da rigidez da estrutura *sandwich*. Analogamente, as restantes propriedades da estrutura derivam das propriedades da espuma metálica que, como sabemos previamente, é um material extremamente leve e ideal para aplicações onde possa ser sujeito a choques, devido à sua alta capacidade de absorção de energia.

As propriedades de uma estrutura *sandwich* com núcleo em espuma metálica são ideais para aplicações na indústria dos transportes. Por exemplo, a leveza e resistência destas estruturas torna-as apetecíveis para aplicações em painéis traseiros e dianteiros de um automóvel, que são componentes críticos numa colisão. Com estas considerações em mente procedemos a uma análise da influência da espessura destas estruturas no seu comportamento mecânico. Esta análise vem no seguimento de estudos previamente efectuados pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Porto.





## ABSTRACT

We can find sandwich structures in a large range of engineering fields. It was understood, early on, that the combination of different materials - forming a sandwich - resulted in a combination of the properties of those same materials. So, for certain applications - which have a high mechanical requirements - the utilization of this kind of structures became a powerful tool.

Combining the properties of the aluminium plates (the 'skin' of the sandwich structure) with the properties of the metal foam (the core) we can obtain a high-resistant and light-weight structure. The resistance of the aluminium plates is the main origin of the overall structure stiffness. Consequently, the other properties of the sandwich structure originate from the metal foam properties which, as we previously know, is a super light weight material and ideal for shock application, due to its high energy absorption capacity.

The properties of the sandwich structure with metal foam core are ideal for applications in the transportation industry. The lightness and resistance of these structures makes it suitable for usage on quarter-panels of an automobile, which are critical components in a collision.

With these considerations in mind we proceed to an analysis of the influence of the core thickness on the mechanical behavior of the sandwich structure. This analysis comes in line with previous studies made by the Mechanical Engineering Department of the *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*.



# ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XIX</b>
<b>NOMENCLATURA</b>	<b>XXI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 NOTA INTRODUTÓRIA . . . . .	1
1.2 APRESENTAÇÃO E OBJECTIVOS DA TESE . . . . .	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE . . . . .	3
REFERÊNCIAS . . . . .	3
<b>2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE</b>	<b>5</b>
2.1 BREVE INTRODUÇÃO HISTÓRICA SOBRE SEGURANÇA RODOVIÁRIA . . . . .	5
2.2 ESTRUTURA SANDWICH . . . . .	8
2.3 ORIGEM . . . . .	9
2.4 ACTUALIDADE. . . . .	11
REFERÊNCIAS . . . . .	11
<b>3. ESTRURA SANDWICH COM COM NÚCLEO EM ESPUMA METÁLICA</b>	<b>13</b>
3.1 FACES . . . . .	13
3.2 NÚCLEO . . . . .	14
3.3 ADESIVO. . . . .	15
3.4 CONSIDERAÇÕES ESTRUTURAIS E MODOS DE FALHA . . . . .	17
3.5 ESTRUTURA DA ESPUMA DO NÚCLEO . . . . .	19
3.5.1 ESPUMAS METÁLICAS DE CÉLULA ABERTA . . . . .	20
3.5.2 ESPUMAS METÁLICAS DE CÉLULA FECHADA . . . . .	21
3.5.3 PROCESSO DE FABRICO DA ESPUMA . . . . .	22
3.5.4 APLICAÇÕES. . . . .	30
3.6 ESTRUTURA DA CHAPA DAS FACES . . . . .	32

3.6.1	PROCESSO DE FABRICO DA CHAPA . . . . .	32
3.6.2	APLICAÇÕES . . . . .	33
	REFERÊNCIAS . . . . .	35
<b>4.</b>	<b>ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ESTRUTURA SANDWICH</b>	<b>37</b>
4.1	ENSAIO DE FLEXÃO DE TRÊS PONTOS. . . . .	37
4.2	ENSAIO UCB. . . . .	47
4.3	COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS . . . . .	54
	REFERÊNCIAS . . . . .	57
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>59</b>
5.1	CONCLUSÕES . . . . .	59
5.2	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	62





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Amostra da estrutura sandwich a estudar.[1]	2
Figura 2: Constituintes de uma estrutura <i>sandwich</i> [5]	8
Figura 3: Influência da espessura em algumas propriedades mecânicas [7]	8
Figura 4: Viga com perfil em I [7]	10
Figura 5: Exemplo de materiais para as faces de uma estruturas <i>sandwich</i> . [4, 5]	14
Figura 6: Exemplos de materiais utilizados como núcleo numa estrutura sandwich. [8, 9, 10]	14
Figura 7: Possíveis falhas de um adesivo. [7]	16
Figura 8: Célula aberta vs. Célula fechada [15]	19
Figura 9: Espuma metálica de célula aberta.[20]	21
Figura 10: Espuma metálica de célula fechada.[20]	22
Figura 11: Diferentes processos de fabrico da espuma metálica. [19]	23
Figura 12: Processo fabrico de insuflação de ar através de uma liga metálica no estado líquido. [19]	24
Figura 13: Processo fabrico de espuma metálica, mistura de um agente no metal no estado líquido controlando a pressão no arrefecimento.[19]	26
Figura 14: Consolidação de um pó metálico com um agente seguido de um aquecimento até que o agente liberte o hidrogénio contido nele, expandindo o material.[19]	27
Figura 15: Processo de 'Investment Casting'[12]	29
Figura 16: Aplicações, propriedades e funções das espumas metálicas. [20]	31
Figura 17: Processo de Laminagem.	32
Figura 18: Latas de refrigerantes em Alumínio. [21]	33
Figura 20: Carroceria em alumínio do Jaguar XE. [23]	34
Figura 19: Fuselagem de uma aeronave em alumínio. [22]	34
Figura 21: Algumas aplicações na construção civil de estruturas em alumínio. [24, 25]	35
Figura 22: Configuração do ensaio de flexão de três pontos. [1]	38
Figura 23: Modelo numérico - Ensaio de flexão de três pontos	38
Figura 24: Detalhe da convergência da malha para o interior do provete.	39
Figura 25: Ensaio de tracção do alumínio EN AW 5754. [1]	41
Figura 26: Curva de tensão - deformação ensaio de compressão da espuma metálica. [3]	42

<b>Figura 27: Curva força - deformação obtida pela simulação numérica.</b>	<b>45</b>
<b>Figura 28: Configuração do ensaio UCB. [1]</b>	<b>47</b>
<b>Figura 29: Modelo numérico - ensaio UCB</b>	<b>48</b>
<b>Figura 30: Resultados do ensaio UCB. Curva força - deformação.</b>	<b>52</b>
<b>Figura 31: Ensaio UCB realizado em 2014. Detalhe de separação de camadas. [1]</b>	<b>53</b>
<b>Figura 32: Gráfico Força máxima - espessura dos resultados das simulações numéricas</b>	<b>55</b>
<b>Figura 33: Gráfico Força máxima - peso dos resultados das simulações numéricas.</b>	<b>55</b>
<b>Figura 34: Gráfico Força máxima - momento de inércia dos resultados das simulações numéricas.</b>	<b>56</b>







## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades de alguns adesivos [6]	15
Tabela 2: Modos de falha de uma estrutura <i>sandwich</i> . [13]	18
Tabela 3: Numero de elementos utilizados na simulação numérica.	40
Tabela 4: Propriedades das faces em alumínio. [3]	40
Tabela 5: Constantes elásticas e plásticas da espuma metálica de célula fechada (ALPORAS) [3]	42
Tabela 6: Deformadas da simulação numérica	43
Tabela 7: Deformadas da simulação numérica do ensaio UCB.	50



# NOMENCLATURA

## Lista de abreviaturas

**PUR** – Poliuretano

**PS** – Poliestireno

**UCB** – Unconstrained Cylindrical Bending

**F3P** – Flexão em 3 Pontos

## Lista de símbolos

$\rho$  Densidade

$\rho^-$  Densidade Relativa

$\alpha$  Pârametro interno do material

$\varepsilon^y$  Deformação segundo o eixo Y

$\sigma$  Tensor das tensões

$E$  Módulo de Young

$\vartheta$  Coeficiente de Poisson

$\vartheta_p$  Coeficiente de Poisson Plástico

$k$  Módulo de compressibilidade

$F$  Força aplicada

$d$  Deslocamento uniaxial

$m$  Massa

$I_z$  Momento de Inércia

$e$  Espessura do núcleo



# 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo inicial iremos realizar um enquadramento do tema desta tese bem como uma breve descrição dos objectivos principais da mesma. As principais motivações que levaram a elaboração desta tese também serão um tema abordado neste capítulo. Para tal apresenta-se uma breve nota introdutória que culminará na apresentação e objectivos a realizar no trabalho de investigação efectuado ao longo desta tese. De forma a facilitar a leitura do documento, faremos também uma descrição da organização de todos os conteúdos presentes nesta tese.

## 1.1 NOTA INTRODUTÓRIA

A realização desta tese vem no seguimento do programa de estudos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto relativo ao Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. A sua elaboração incide no estudo do comportamento mecânico de uma estruturas *sandwich* com núcleo em espuma metálica, com especial interesse na variação da espessura do núcleo. A presente tese vem ainda no seguimento do estudo realizado em 2014 em tese de doutoramento pelo o Eng. Helder Mata, em colaboração com o Prof. Doutor Renato Natal Jorge.

As principais motivações que levaram à realização da presente tese estão relacionadas com a crescente potencialidade de utilização deste tipo de estruturas. Uma das possíveis aplicações destes painéis *sandwich* passam por componentes de automóveis, como já veio a ser testado no estudo efectuado pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto desde 2008. Com a crescente população mundial e inerentemente o uso de automóveis, vem vários problemas associados. A segurança dos passageiros e a eficiência energética destes veículos é um tema que vem sido abordado ao longo dos ultimos anos. Com o descobrimento de um material com alta absorção de energia e baixa densidade relativa (espuma metálica), ficou clara a sua utilidade na indústria automóvel. É agora possível estudar as particularidades deste material, quer em termos de segurança rodoviária, quer em termos energéticos.

A falta de informação sobre este tipo de estrutura leva-nos a estudar as suas propriedades e particularidades. Com a realização desta tese pretende-se dar a conhecer a influência da espessura do núcleo em espuma metálica na rigidez da estrutura *sandwich*.

## 1.2 APRESENTAÇÃO E OBJECTIVOS DA TESE

Após uma breve introdução e avaliadas as motivações que nos levaram à realização desta tese podemos passar à descrição dos objectivos inicialmente pretendidos.

A presente tese tem por base o estudo do comportamento mecânico de uma estrutura *sandwich* com núcleo em espuma metálicas. Estas estruturas caracterizam-se por serem uma opção atractiva para várias aplicações estruturais, principalmente ligadas ao ramo das indústrias automóvel, aeronáutica e aeroespacial. A estrutura é formada por um núcleo poroso de alumínio, com baixa densidade relativa, por duas faces, também em alumínio, ligados por um adesivo à base de poliuretano.



**Figura 1:** Amostra da estrutura sandwich a estudar.[1]

Com base na pouca informação relativa a este tipo de estruturas e considerando-a como uma solução muito atractiva para combater a crescente sinistralidade nas estradas, esta tese procura estabelecer linhas de investigação que nos permita:

- através de simulações numéricas, estabelecer uma relação entre peso, espessura e comportamento mecânico deste tipo de estruturas;

Este é o principal objectivo desta tese, no entanto, procuraremos, em paralelo, prever o comportamento dos diferentes painéis *sandwich* quando sujeitos a processos de conformação plástica.



## 1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Descritos os principais objectivos desta tese, podemos estabelecer uma linha a seguir do estudo realizado. Para além do presente capítulo, que nos oferece um enquadramento do tema desta tese, a presente organizar-se-á em mais 4 capítulos.

Iniciaremos por descrever os constituintes da estrutura *sandwich*, tal como iremos procurar trabalho desenvolvido relacionado com estas estruturas. Como uma das motivações que levou a realizar esta tese é a preocupação sobre segurança rodoviária, introduzirei este capítulo (2. – Revisão do Estado da Arte) com uma breve nota histórica do desenvolvimento da mesma.

No capítulo 3 (Estrutura *Sandwich* com Núcleo em Espuma Metálica) levaremos ao detalhe todos os constituintes da estrutura *sandwich*. Passando pelos diversos processo de fabrico, propriedades e características, bem como aplicações de todos os constituintes.

Detalhados todos os componentes da estrutura, no capítulo 4 estudaremos o comportamento mecânico da estrutura *sandwich* para diferentes espessuras do núcleo. Serão simulados em ‘Abaqus’ dois ensaios de flexão que serão objecto de estudo e comparação.

Finalmente, no capítulo 5, será feito o ponto de situação do trabalho efectuado, bem como uma perspectiva de trabalhos futuros que complementam o trabalho realizado pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e esta tese.

## REFERÊNCIAS

[1] Mata, Hélder T C, “Estudo de Estruturas Sandwich Hidroformadas Constituídas por Núcleo de Espumas Metálicas”, Tese de Doutoramento, FEUP, 2014, Porto



## 2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Neste capítulo iremos demonstrar alguns dos conceitos base de uma estrutura sandwich bem como o seu desenvolvimento histórico. Visto tratar-se de uma tecnologia que tem vindo a ser utilizada cada vez mais em componentes de alta exigência mecânica, iremos também dar um enquadramento histórico com paralelismo entre o desenvolvimento da Indústria Automóvel na Europa e as preocupações sobre segurança rodoviária ao longo dos séculos XX e XXI.

### 2.1 BREVE INTRODUÇÃO HISTÓRICA SOBRE SEGURANÇA RODVIÁRIA

No final do século XIX, com o aparecimento do motor de combustão interna (Karl Benz, 1885 e Gottlieb Daimler, 1886) surge na Europa uma indústria de veículos autopropulsionados, o que hoje é conhecida como a indústria automóvel. Inicialmente a posse de um automóvel apenas era possível para a classe mais alta da sociedade da época, devido ao preço elevado destes equipamentos. A título de curiosidade, o primeiro automóvel surge em Portugal, pelas mãos do IV Conde de Avilez, em 1895. Este veículo tem como marca a *Panhard & Levassor*. [1]

Desde cedo se percebeu, entre os apaixonados por corridas e competição, que estes ‘artefactos’ podiam ser usados como veículo numa prova de velocidade. Recorde-se que este tipo de eventos apenas se destinavam para uma pequena porção da sociedade, apesar de ser apreciado por praticamente todos. Com o desenvolver do século XX, e com a crescente paixão pelas corridas, os responsáveis das grandes marcas automóveis procuravam melhorar os seus veículos para uma melhor performance nas pistas, com especial atenção à velocidade dos seus automóveis. [2]

Em paralelo com a velocidade, a luxosidade destes veículos era cada vez maior, sendo dirigido para um público específico. Tornando marcas como Rolls Royce e Bentley, com os seus impetuosos carros, ícones dos ‘loucos anos 20’. É nesta altura que, finda a 1ª Guerra Mundial, aparece na indústria a produção em massa e a standardização que têm um papel fundamental para o desenvolvimento automóvel. Neste período o automóvel torna-se muito popular, o que leva ao aparecimento de marcas que produzem veículos para o público em geral. Surge por exemplo o mítico Citroën 7CV (1933) e mais tarde o VW BEETLE (1938). [2]

Até esta data não há uma verdadeira preocupação sobre a segurança destes veículos por

parte dos responsáveis de marcas de automóvel. Sendo registado cada vez mais incidentes envolvendo automóveis bem como o numero de sinistralidades. No entanto, as primeiras preocupações acerca deste tema já tinham sido abordadas por uma entidade mundialmente conhecida, os irmãos Michellin. A série de livros “Michellin Guide” [3] são, hoje em dia, o alto baluarte dos guias sobre gastronomia a nível mundial. Contudo, as primeiras edições destes guias (1900-1922) foram direccionados aos automóveis e a informações uteis sobre as estradas. Inerentemente, a partir da sétima edição deste guia a temática começou a ser desviada para questões de segurança dos utentes das vias públicas. Preocupado com a segurança dos automóveis, entre 1920 e 1931, Michelin decide, por conta própria, colocar sinais (cerca de 77000) na berma das estradas francesas com indicações uteis para os utilizadores, o que hoje é conhecido como sinais de transito. Esta medida foi desde logo abraçada pelo generalidade das pessoas que frequentavam as estradas francesas à data. Esta ideia foi então utilizada pela Europa toda, e surge assim as primeiras medidas de Segurança Rodoviária.[2]

Nesta altura, periodo pré 2ª Guerra Mundial o desporto automóvel vive um auge, havendo cada vez mais competição entre marcas representantes. Sendo o automóvel a imagem da evolução tecnológica do pais que o produz, o desporto torna-se numa questão nacional, havendo assim mais interesse e investimento por parte dos politicos. Durante a 2ª Guerra Mundial a indústria automóvel praticamente desapare na Europa, dando origem a uma indústria bélica. As fábricas e equipamentos até à data utilizados para produzir automóveis passam a ser usados na produção de equipamento militar.[1, 2]

Finda a 2ª Guerra Mundial a Europa encontra na indústria automóvel uma alavanca de desenvolvimento económico. Marcas como a *FIAT* em Itália, a *Volkswagen* na Alemanha, a *Citroen*, *Renault* e *Peugeot* na França e *Austin e Morris* na Grã-Bertanha, vão contribuir de forma decisiva para relançar esses paises na economia mundial. Na década de 50, a produção de automóveis em massa será direccionada para a construção de veículos de mecânica simples. A classe média emergente procura pequenos veículos que permitam cada vez maior autonomia e funcionalidade. Surge assim carros como o *Renault4*, *FIAT 500* e *600* que são veiculos utilitários que se tornaram em icones. [2]

Os anos 60 são uma época de crescimento da estabilidade económica. O emprego seguro, o aumento do nível de vida e o conseqüente apelo ao consumo irão contribuir decisivamente para a massificação do automóvel nas estradas europeias. Na década de 70, começam a surgir as verdadeiras preocupações com a segurança dos passageiros e com a crescente poluição atmosférica.

rica provocada pelos gases emitidos pelo escape dos automóveis.

No ano 1965, Ralph Nader publicou um livro intitulado “Inseguro a qualquer velocidade”. Nessa publicação, o senhor Nader avisa a indústria automóvel que a sinistralidade apresentava-se muito alta e os fabricantes não estavam a levar a sério este grave problema. Desde este ponto as considerações sobre a segurança do condutor e passageiros começaram a passar pela cabeça dos fabricantes de automóveis. Cintos de segurança de 3 pontos, vidros temperados e travões mais eficientes (hidráulicos) foram as primeiras medidas implementadas. No entanto, a sinistralidade continua a crescer com o crescimento da venda de automóveis. Até ao final do século XX a preocupação sobre esta temática é crescente, virando os engenheiros para a procura de técnicas e materiais que ofereçam mais segurança aos utilizadores. [3]

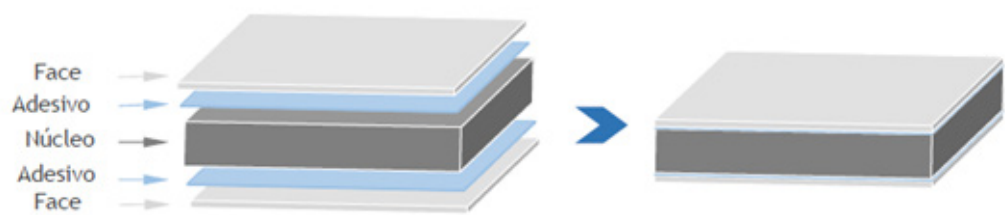
Com estas preocupações em mente e com o desenvolver da indústria, os engenheiros começaram a analisar as causas da sinistralidade crescente. Verificou-se que uma grande maioria de acidentes rodoviários mortais se devia a danos internos sofridos pelos passageiros dos automóveis. Esta causa estaria intrinsecamente ligada com a energia provocada pelo choque, que era totalmente transmitida para o condutor, provocando forças G enormes aos ocupantes das viaturas. Fica então claro que a investigação sobre novos materiais que fossem capazes de absorver essa energia provocada pelo impacto de um automóvel era de enorme importância, devendo ser apostada pelos fabricantes destes veículos. Denominando-se materiais de alta capacidade de absorção de energia. Entre os materiais descobertos que preenchem estes requisitos temos as fibras poliméricas e espumas metálicas.[2]

Estando o nosso trabalho incidido sobre o estudo de estruturas sandwich com núcleo em espuma metálica, iremos no capítulo seguinte mostrar como tem vindo a ser desenvolvida este tipo de tecnologia, desprezando as outras soluções encontrada para este tipo de materiais.

Num estudo realizado em 2004 pela *Commission for Global Road Safety* a 15 Estados Membros da União Europeia mostra que mais de 40000 pessoas morrem nas estradas europeias anualmente e mais de 1.5 Milhoes fica ferido, por vezes com ferimentos permanentes. É com esta preocupação que incide o desenvolvimento desta tese: procurar linhas de investigação que proporcione uma diminuição de sinistros nas estradas mundiais, através do melhoramento dos componentes críticos de um automóvel.[4]


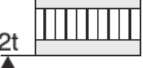
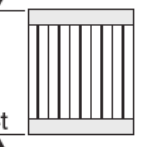
## 2.2 ESTRUTURA SANDWICH

Entende-se por estrutura *sandwich* como uma combinação de elementos estruturais tipo placa fina ou espessa com adesão entre faces, através de uma camada de ligação que garanta a transferência de forças entre eles, um adesivo, como mostra a figura 2 [5]. Desta combinação resulta uma estrutura com elevada rigidez específica, tornando esta solução muito popular em aplicações de alto desempenho. Adicionalmente estas estruturas também são vantajosas do ponto de vista térmico e acústico, dependendo da combinação de materiais utilizados.[6,7]



**Figura 2:** Constituintes de uma estrutura *sandwich* [5]

Apesar de constituída por partes diferentes, este tipo de estruturas funciona essencialmente como um todo. O afastamento das faces leva a um aumento do momento de inércia da estrutura o que provoca um aumento na rigidez da mesma. Ou seja, com um aumento praticamente insignificante no peso da estrutura, a utilização de um núcleo entre as faces oferece um aumento de rigidez muito significativo. A figura 3 demonstra claramente esta característica.[6,7]

	Solid Material	Core Thickness $t$	Core Thickness $3t$
			
Stiffness	1.0	7.0	37.0
Flexural Strength	1.0	3.5	9.2
Weight	1.0	1.03	1.06

**Figura 3:** Influência da espessura em algumas propriedades mecânicas [7]

Combinando diferentes materiais para as faces e o núcleo podemos obter diferentes tipos de estruturas *sandwich* para uma dada solicitação. Na presente tese será abordada uma combinação para aplicação em componentes automóvel sujeitos a colisões. Para este tipo de solicitação será esperado que a estrutura, para além de ser leve, por questões de eficiência energética, tenha uma grande capacidade de absorção de energia. Encontrando-se ainda sob investigação, será também importante estimar os custos acrescidos da utilização deste tipo de estruturas, quer na sua obtenção, quer na conformação plástica do componente.

## 2.3 ORIGEM

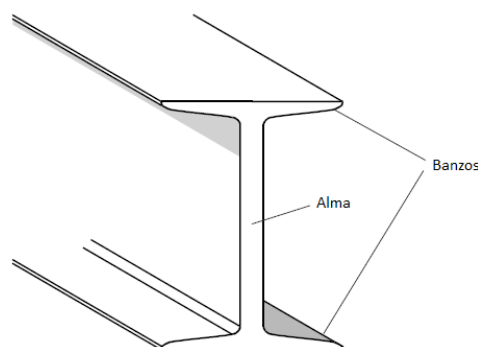
Tal como muitas tecnologias descobertas ao longo de milhares de anos, a *estrutura sandwich* resulta também da observação da natureza. Estas estruturas estão presentes, por exemplo nas asas das aves, nas folhas de árvores, nos ossos, etc... Este último exemplo serve como analogia ao tipo de estrutura estudada nesta tese, sendo as faces compostas por uma casca, responsável pela resistência à flexão do osso e o núcleo preenchido por uma espuma (material poroso), que oferece a rigidez necessária ao mesmo tempo que é mais leve que o mesmo material sem porosidade.[5 - 9]

A título de curiosidade, o nome deste tipo de estruturas deve-se a Jonh Montagu, IV Conde de Sandwich, e primeiro Lorde da Marinha Inglesa me 1762. Pressionado pela guerra da Revolução Americana, Jonh intercalava as reuniões estratégicas entre os seus comandantes com pequenas refeições. Estas consistiam numa fatia de carne entre dois pedaços de pão. A partir desta altura surge, quer o nome da comida, como o tipo de estrutura.[8]

Historicamente o conceito de estrutura *sandwich* como hoje é conhecida surge apenas em 1820. No entanto, apenas 110 anos depois foi posto em prática em pequenos aviões, que usavam faces em papelão e amianto prensado como materiais dessa estrutura. No decorrer da 2ª Guerra Mundial, e com a escassez de materiais, os Britânicos desenvolveram o primeiro projecto a usar comercialmente, e em série, o conceito de estrutura *sandwich*. Este projecto fica conhecido como *Mosquito*, e consiste num avião com grande parte da fuselagem com painéis em *sandwich*. Estes painéis são constituídos por faces em chapas de madeira prensada fina e núcleo em madeira de balsa, que é uma madeira extremamente leve. [8,9]

Os fundamentos teóricos deste tipo de estrutura são desenvolvidos a partir da teoria das vigas com perfil em “I”, figura 4. Numa viga deste tipo o papel dos banzos pode ser comparado

com o papel das faces numa estrutura *sandwich*, sendo o principal responsável pela resistência à flexão da viga. Por sua vez, o papel da alma é semelhante á do núcleo numa estrutura *sandwich*, para além de ser o responsável pela separação das faces (banzos), oferece uma rigidez maior à estrutura bem como é o principal responsável pela absorção de tensões de corte.[7]



**Figura 4:** Viga com perfil em I [7]

Em meados dos anos 60 aparecia, na construção de componentes de alto desempenho, as fibras de origem polimérica. Estes materiais, apesar de apresentarem altos módulos de elasticidade e densidade relativa baixa, tinham uma rigidez não muito alta, quando comparada com os materiais usados na altura. No entanto, devido ás suas vantagens ficou claro que estes materiais podiam ter grande utilidade. De forma a melhorar a rigidez dos painéis de fibra, o engenheiros optaram por uma construção em *sandwich*, tornando assim este material o ideal para a construção de componentes de alto desempenho.

Ao longo das dezenas de anos seguintes, a tecnologia de construção em *sandwich* tem vindo a ser tema de investigação de inumeras entidades. Combinando diferentes tipos de materiais na construção deste tipo de estrutura é possível obter diversos componentes com características mecânicas específicas. Hoje em dia estas estruturas são utensilios essenciais na construção de edifícios, por questões térmicas e acústicas, na indústria dos transportes, por questões térmicas, acústicas, de segurança e de eficiência energética, bem como nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, pelas diversas razões apresentadas anteriormente.[5 - 9]



## 2.4 ACTUALIDADE

No presente trabalho iremo-nos focar numa estrutura *sandwich* com núcleo em espuma metálica e faces em alumínio laminado. Estas estruturas são essencialmente vantajosas devido á sua alta rigidez especifica quando comparadas com painéis de alumínio normalmente utilizados. Para além da sua rigidez, este tipo de construção em espuma metálica oferece altos coeficientes de absorção de energia. Diversas investigações tem vindo a ser realizadas com o intuito de conformar plásticamente estas estruturas de forma a serem utilizadas em componentes de automóveis ou aeronaves. Esta dificuldade parte essencialmente de problemas com a adesão entre as faces e o núcleo destas estruturas, ocorrendo delaminação (separação de camadas).

Recentemente foram apresentadas soluções para este genero de problema. A substituição dos painéis de aluminio por painéis de fibra de origem polimérica, tratamento térmico superficial da espuma e adição de material cristalino na espuma metálica são algumas soluções que têm vindo a ser desenvolvidas.[11, 12]

## REFERÊNCIAS

- [1] <http://www.educacao-rodoviaria.pt/lazer/85-a-historia-e-evolucao-do-automovel-em-portugal>
- [2] <http://www.circulaseguro.pt/veiculos-e-tecnologia/como-evoluiu-seguranca-dos-automoveis-em-40-anos-ii>
- [3][http://www.christies.com/presscenter/pdf/2016/REL\\_108\\_MICHELIN\\_GUIDES\\_DECEMBER\\_2016.pdf](http://www.christies.com/presscenter/pdf/2016/REL_108_MICHELIN_GUIDES_DECEMBER_2016.pdf)
- [4] Commission for Global Road Safety, “Make Roads Safe - A new priority for sustainable development”, World Health Organization, 2004.
- [5] Mata, Hélder T C, “Estudo de Estruturas Sandwich Hidroformadas Constituídas por Núcleo de Espumas Metálicas”, Tese de Doutoramento, FEUP, 2014, Porto

- [6] Pereira, Rui J B, Phd - “Análise estrutural de vigas sandwichde alumínio-aglomerado de cortiça”, 2014, Aveiro
- [7] Hexcel Composites - Honeycomb Sandwich Design Technology [online]. 2000.
- [8] Jorge Nasseh, “Barcos – Métodos avançados de Construção em compósitos”,2007,Rio de Janeiro
- [9] Carvalho, Pedro M R,Tese Mestrado - “Análise do comportamento mecânico e identificação do tipo de falha em estruturas sandwich com núcleos de cortiça”,2008,Lisboa
- [10] MF Ashby et al., “Metal foams: a design guide”, Oxford, Butterworth-Heinemann.
- [11] “Numerical Modeling of Energy Absorption Behaviour of Aluminium Foam Cored Sandwich Panels with Different Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composite Facesheet Skins”, 2016
- [12] Low Velocity Impact of Aluminium Foam - Glass Fibre Reinforced Plastic Sandwich Panels, 2015

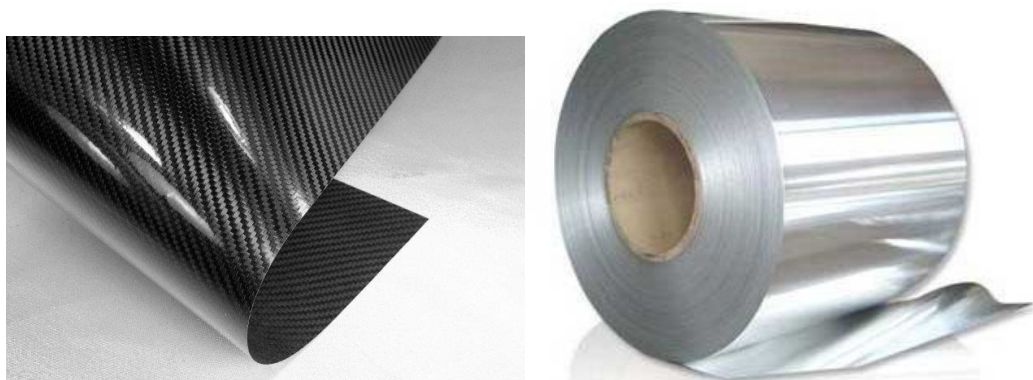
### 3. ESTRURA SANDWICH COM COM NÚCLEO EM ESPUMA METÁLICA

No presente capítulo iremos dar a conhecer, de uma forma mais detalhada, os componentes da estrutura *sandwich* e as suas principais características, quer dos materiais quer do aglomerado. Para além das vantagens e desvantagens deste tipo de estruturas, iremos também dar alguns exemplos de aplicações.

Antes de qualquer análise detalhada é importante lembrar que o principal objectivo de uma estrutura *sandwich*, do tipo chapa, é combinar um aumento de rigidez global da estrutura com o aumento da sua espessura. Com o aumento da espessura da chapa para o dobro iria provocar um aumento do peso da estrutura para o dobro também. No entanto, a adição de uma camada de baixo peso entre as faces da estrutura irá provocar o desejável aumento da rigidez global da estrutura a um custo diminuído de aumento de peso [1,2].

#### 3.1 FACES

O principal papel das faces neste tipo de estrutura é o de suportar tensões normais, pelo que o material utilizado para este componente terá de apresentar uma rigidez elevada. Para além do módulo de elasticidade elevado, os materiais escolhidos para as faces podem também apresentar outras propriedades dependendo do tipo de aplicação da estrutura. Entre essas propriedades temos: dureza, isolamento térmico, isolamento acústico e resistência à corrosão. Uma característica que convém referir separadamente é a elasticidade dos materiais escolhidos. É desejável que todos os materiais usados na estrutura *sandwich* apresentem módulos de elasticidade dentro da mesma gama. Isto é importante do ponto de vista da ‘harmonia’ entre as interfaces, ou seja, é desejável que todos os componentes se comportem elasticamente de maneira semelhante, para combater os problemas associados à separação de camadas.[2,3]



**Figura 5:** Exemplo de materiais para as faces de uma estruturas *sandwich*. [4, 5]

Os principais materiais utilizados nas faces de estruturas *sandwich* são aços, ligas de alumínio, madeiras e seus derivados e materiais de origem polimérica. Nesta tese iremos dar atenção a faces em liga de alumínio. As principais vantagens do uso deste material são a elevada resistência mecânica destas ligas e a boa resistência à corrosão, para além da sua facilidade de obtenção.[2, 3, 6]

## 3.2 NÚCLEO

O principal papel do núcleo numa estrutura *sandwich* é suportar os esforços de corte e compressão, para além de, com ele, as faces fiquem afastadas o que provocará uma maior resistência à flexão. É necessário também que apresentem uma densidade relativa bastante baixa, de forma a justificar a sua utilização. Como já havíamos referido, o material das faces e do núcleo, idealmente, terão de ter um comportamento à flexão semelhantes, para evitar o deslize das faces em relação ao núcleo, ou vice-versa. Outras características importantes são o isolamento térmico e acústico bem como o controlo de vibrações.[3, 7]

O primeiro material utilizado como núcleo numa estrutura *sandwich* foi a madeira de bal-



**Figura 6:** Exemplos de materiais utilizados como núcleo numa estrutura *sandwich*. [8, 9, 10]

sa, que ainda hoje é utilizada graças à sua baixa densidade e facilidade de trabalhar. Os materiais mais utilizados na maioria das aplicações são espumas poliméricas expandidas como o poliuretano (PUR) e poliestireno (PS). Estes materiais, sendo expandidos, são ideais para a construção de formas complexas e utilizam-se maioritariamente na construção civil. Alternativamente, para um uso mais exigente a nível mecânico utilizam-se materiais de origem metálica, geralmente sob a forma de favo de abelha ou em espuma metálica.[2,3]

### 3.3 ADESIVO

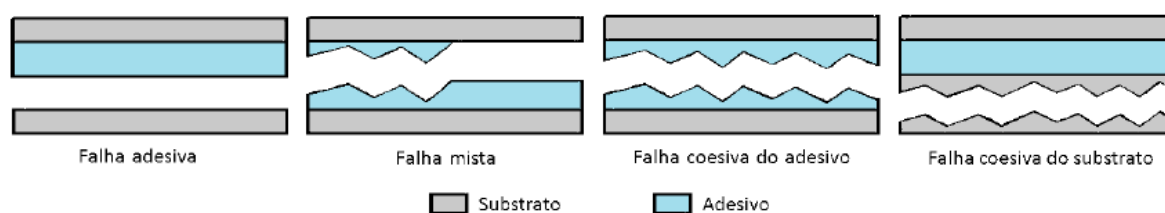
Numa estrutura *sandwich*, o adesivo é parte integrante da mesma, logo deverá apresentar propriedades mecânicas idênticas aos materiais constituintes da estrutura a ser colada. Existe uma vasta gama de adesivos que podemos utilizar na união de juntas de materiais estruturais, dependendo dos materiais a colar e da sua solicitação [11]. Habitualmente utilizam-se adesivos da família dos fenólicos, acrílicos, poliuretanos, poliimidas e epóxidos. Na tabela 1 estão presentes algumas características destes adesivos. De notar que algumas propriedades enunciadas podem ser alteradas com a adição de outras resinas ou por elastómetro.[6]

**Tabela 1: Propriedades de alguns adesivos [6]**

Família	Vantagens	Desvantagens
Fenólicos	Baixo Custo; boa resistência mecânica; boa resistência a temperaturas elevadas.	Baixa resistência à corrosão por solventes; baixa resistência ao impacto; fragilidade devido ao processo de cura.
Acrílicos	Boa resistência a solventes	Resistência mecânica muito variável.
Poliuretanos	Boa flexibilidade; bom comportamento a baixas temperaturas; boa resistência ao arrancamento; boa tenacidade.	Toxicidade do isocianeto; baixa resistência ao corte à temperatura ambiente.
Poliimidas	Grande dureza.	Custo bastante elevado; frágeis; pouco tenazes; fraca resistência a vibrações.
Epóxidos	Boa resistência mecânica; não produz agentes voláteis durante a cura; apresentam pouca contração.	Custo bastante elevado; baixa resistência ao impacto

*“Uma das principais caracterisiticas de um bom adesivo é a capacidade de endurecer durante o processo de polimerização e sofrer deformação durante o endurecimentode forma a libertar tensões residuais existentes” [1]*

No entanto, pode ocorrer algum tipo de imprevisto ou falha na aplicação do adesivo. Algumas das consequências podem ser provocadas por uma escolha errada do adesivo, por uma má aplicação (tempo de cura, temperatura de cura, etc..), uma solicitação indevida, entre outros factores menos correntes. É possível analisar a falha de uma junta adesiva e perceber o tipo de falha que temos. Na figura 7 temos os diferentes tipos de falha que poderá ocorrer numa junta adesiva. [7]



**Figura 7:** Possíveis falhas de um adesivo. [7]

Através da análise da rotura na estrutura podemos determinar a origem da falha. Numa junta as falhas podem ter causa no adesivo, no substrato ou numa combinação dos dois. Para além da origem da falha podemos ainda classificá-la como adesiva (separação do adesivo na interface) ou coesiva (quebra da adesão, ou do adesivo ou do próprio material a colar). [7]

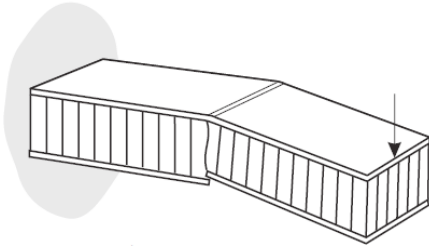
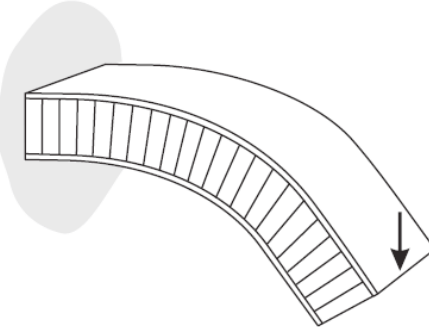

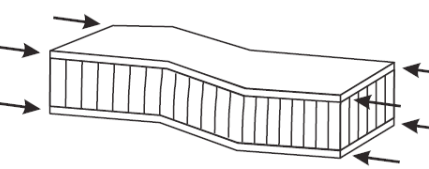
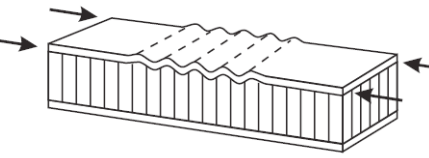
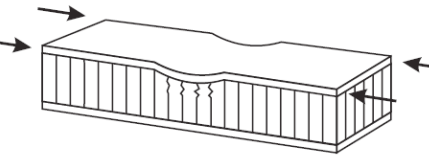
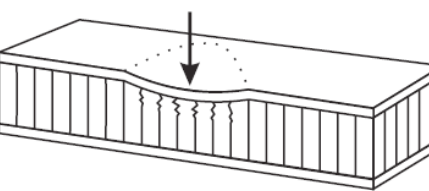
No entanto é possível obter estruturas sandwich com núcleo em espuma metálica sem o uso de adesivos estruturais, dependendo do método de obtenção da espuma metálica.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES ESTRUTURAIS E MODOS DE FALHA

No projecto de uma estrutura *sandwich* é necessário seguir vários critérios estruturais. Estes critérios estão relacionados com a interação entre os materiais da estrutura, bem como as solicitações a que estão sujeitos. Como já vimos anteriormente, o núcleo será constituído por um material de baixa densidade e com um módulo de rigidez ao corte suficiente para evitar o escorregamento das faces em relação ao núcleo. Para além destas características, terá também de apresentar uma rigidez suficiente para manter as duas faces equidistantes ao longo da estrutura. Relativamente às faces, como também já havíamos visto, estas terão de apresentar elevada resistência mecânica de forma a suportar as tensões normais, que aqui serão máximas, bem como os esforços axiais. Quanto ao adesivo, este terá de ser capaz de manter a ligação entre o núcleo e as faces de uma forma rígida, de forma a transmitir os esforço entre as faces. Será também importante ter considerações acerca da temperatura de funcionamento do componente, pois as suas características podem-se alterar com diferentes temperaturas.[12, 13 14]

Funcionando em conjunto, estes componentes comportam-se como um só. Os principais modos de falha de uma estrutura *sandwich* estão descritos na tabela 2.[13]

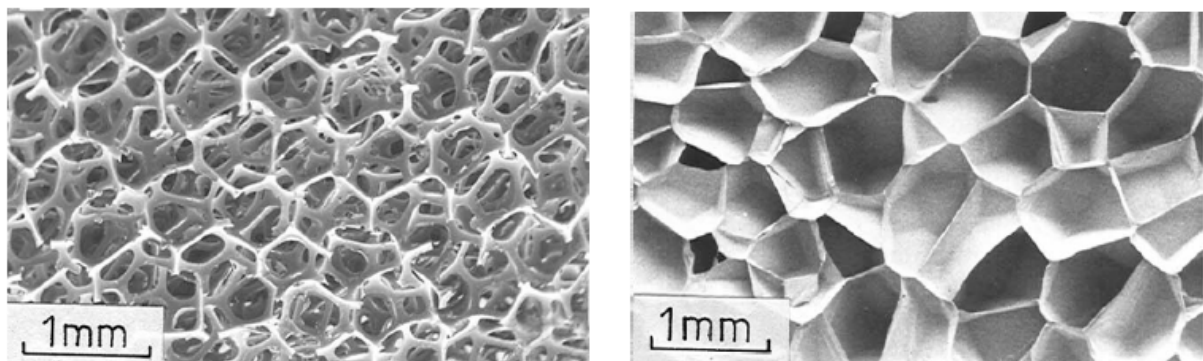
**Tabela 2: Modos de falha de uma estrutura *sandwich*. [13]**

Modo de Falha	Ilustração	Descrição
Resistência		Os materiais das faces e do núcleo devem ser capazes de resistir às tensões normais e de corte induzidas. Assim como o adesivo terá de ser capaz de garantir a transferência de das tensões de corte entre as peles e o núcleo.
Rigidez		A estrutura deve possuir rigidez suficiente para evitar flexão excessiva.
Deformação Local		A espessura do núcleo e o módulo de corte têm de ser adequados de modo a prevenir a deformação local da estrutura devido a cargas de compressão.
Deformação Global		Pode ser consequência da deformação local. Assim como na deformação local, a espessura do núcleo e o módulo de corte têm de ser adequados.
Enrugamento das faces		A resistência do núcleo à compressão terá de ser suficiente, bem como a resistência dos adesivos na situação de tensão no palmo.
Instabilidade Intracelular		Na presença de um núcleo celular, de modo a não ocorrer este tipo de falha, o tamanho das células deverá ser suficientemente pequeno em relação à espessura das faces.
Esmagamento local do Núcleo		A resistência à compressão do material do núcleo não pode ser demasiado baixo.



### 3.5 ESTRUTURA DA ESPUMA DO NÚCLEO

As espumas metálicas inserem-se na categoria de materiais porosos ou celulares. Existem vários exemplos na natureza deste tipo de materiais: cortiça, madeira, osso humano, etc... Comum a todos eles é a microestrutura consistida numa rede tridimensional de suportes (célula aberta) ou paredes (célula fechada). Para um melhor entendimento deste conceito de célula aberta/fechada a figura 8 mostra essa particularidade entre os materiais celulares.[15]



**Figura 8:** Célula aberta vs. Célula fechada [15]

Desde que existe registo bibliográfico, a primeira pessoa a procurar entender a geometria e comportamentos mecânicos deste tipo de material foi o reconhecido matemático Suíço Leonhard Euler (1707-1783). Desde então tem havido uma vasta literatura sobre a geometria, comportamento mecânico, térmico e eléctrico destes materiais. Lorna J. Gibson e Michael F. Ashby desenvolveram uma extensa investigação neste ramo em finais do século XX (*'Cellular Solids – Structure and properties'*, 1997).[15]

Estas estruturas celulares apresentam uma configuração que alia uma rigidez elevada a uma densidade relativa baixa. Visto que os principais desenvolvimentos na literatura destas estruturas apenas aparecem no final do século XX, estas ainda são pouco conhecidas pelos engenheiros. Hoje em dia a investigação incide maioritariamente na capacidade de melhorar o processo de fabrico destes materiais, devido ao grande potencial de aplicação dos mesmos. Com propriedades como elevada relação rigidez/peso, capacidade de absorção de energia e vibrações e isolamento térmico é fácil compreender o interesse dos engenheiros por encontrar métodos de cálculo e processos de fabrico alternativos para a obtenção destes materiais. Com esta constante melhoria na tecnologia, o mercado para este tipo de material é cada vez mais significativo, não

incidindo apenas nas indústrias aeronáutica e aeroespacial. Hoje em dia é possível encontrar estes materiais nas mais diversas indústrias.[16 - 19]

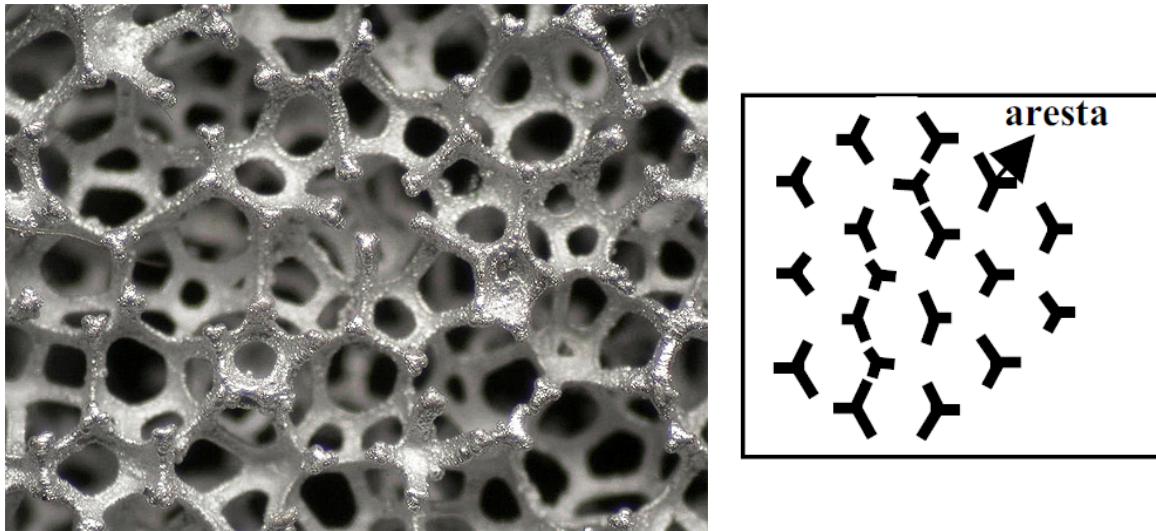
Como já tínhamos referido a estrutura das espumas é definida por um arranjo tridimensional de células. Se os poros da espuma partilharem entre si as paredes e arestas a espuma é classificada como célula fechada. Caso a estrutura seja uma rede interligada a espuma designa-se por célula aberta, como mostram as figuras 8 e 9. De notar que estas espumas, normalmente apresentam valores de vazios na ordem dos 75-95%, isto é, apenas 25-5% do volume é ocupado por material.[16 - 18]

As características estruturais das espumas, nomeadamente: a forma e o tamanho das células, a forma em que o sólido é distribuído entre as arestas e as faces e as propriedades da matriz metálica, são factores determinantes nas propriedades da espuma. Para além destes factores, são igualmente importantes a percentagem de células e a anisotropia de forma. Através da escolha do processo de fabrico apropriado ou através da manipulação dos parâmetros de um determinado processo pode-se obter diferentes estruturas celulares no que respeita à morfologia (tamanho e forma) mais adequada para uma dada aplicação.[20]

Para além das propriedades referidas, as mais significativas, as espumas metálicas apresentam ainda outras características que podem ser vantajosas a nível do projecto. Não inflamável, reciclável, capacidade de flutuação e algumas propriedades térmicas são características que derivam do material base da espuma e podem ser manipuladas a de forma vantajosa. [18, 19]

### **3.5.1 ESPUMAS METÁLICAS DE CÉLULA ABERTA**

As espumas metálicas com estrutura de célula aberta denomina-se deste modo devido aos poros apenas partilharem entre si as arestas que os formam. Esta característica pode ser observada microscopicamente ou pela avaliação da permeabilidade da espuma. Apenas as espumas metálicas de célula aberta têm a capacidade de serem usadas como filtros devido à sua permeabilidade. Na figura 9 podemos observar estas características da espuma. [16 - 19]

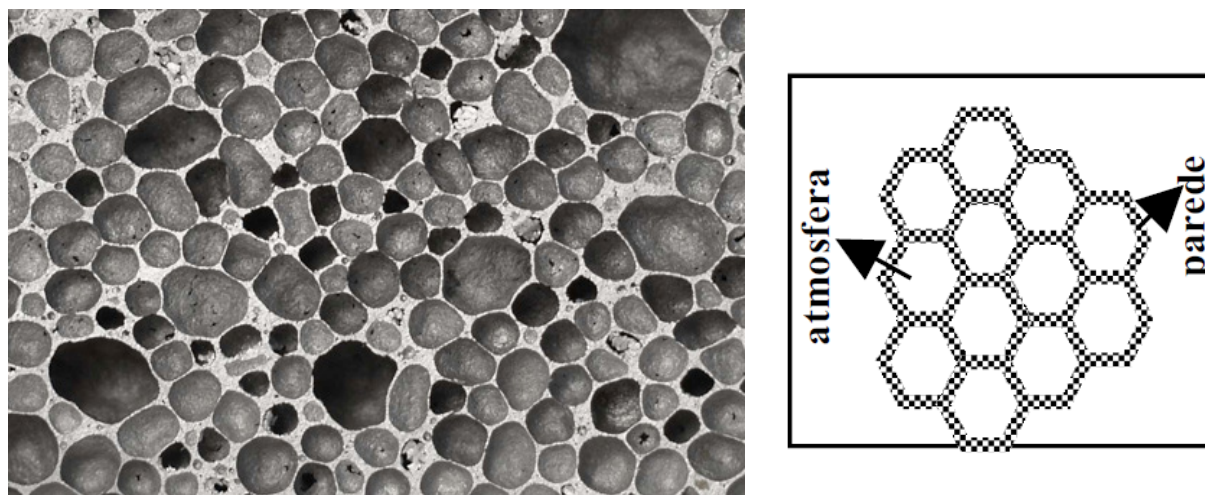


**Figura 9:** Espuma metálica de célula aberta.[20]

As espumas metálicas de célula aberta são normalmente utilizadas em aplicações mais exigentes devido ao alto custo de produção e desempenho, indústria aeroespacial. No entanto, podem também ser utilizadas noutras aplicações, incluindo permutadores de calor, absorção de energia ou difusão de fluxo. Como já tínhamos referido, estas espumas de célula aberta, quando o tamanho das células é pequeno, podem ser utilizadas como filtros de alta temperatura.[1]

### 3.5.2 ESPUMAS METÁLICAS DE CÉLULA FECHADA

Em comparação com as espumas metálicas de célula aberta, as espumas metálicas de célula fechada são constituídas por células que partilham entre si, para além das arestas, paredes que separam as células. Esta característica pode ser visível na figura 10. Os poros destas espumas são geralmente feitos por injeção de um gás ou mistura de um agente( $\text{TiH}_2$  maioritariamente) que promove o aparecimento de porosidades em metais fundidos.



**Figura 10:** Espuma metálica de célula fechada.[20]

De forma a estabilizar as bolhas no metal fundido, necessita-se um agente formador de espuma de alta temperatura. Lembra-se que o alumínio funde a uma temperatura superior a 660°C. Geralmente o tamanho das células é na ordem de 1 – 8 mm. Estas espumas são frequentemente utilizadas em solicitações de impacto, devido à sua boa capacidade de absorção de energia. Ao contrário das espumas de origem polimérica, as espumas metálicas mantêm-se deformadas após o impacto.

### 3.5.3 PROCESSO DE FABRICO DA ESPUMA

O processo de fabrico das espumas metálicas ainda é tema de investigação por parte da comunidade científica. No entanto, já existem vários avanços nesta área de investigação. As propriedades das espumas metálicas e outras estruturas celulares dependem essencialmente das propriedades do metal de base, da densidade relativa e do tipo de estrutura da célula. Existem diversas técnicas de obter espumas metálicas, entre as mais comuns temos (de notar que entre parênteses recto temos o tipo de liga utilizado em cada processo): [19]

- I. Insuflação de ar através da liga metálica no estado liquido, Al-SiC ou Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; [Al,Mg]
- II. Mistura de um agente (tipicamente TiH<sub>2</sub>) no metal no estado liquido controlando a pressão no arrefecimento; [Al]
- III. Consolidação de um pó metálico (comumente ligas de aluminio) com um agente (nova-

mente  $TiH_2$ ) seguido de um aquecimento até que o agente liberte o hidrogénio contido nele, expandindo o material; [Al, Zn, Fe, Pb, Au]

IV. Produção de um molde cerâmico através de uma cera ou um precursor espuma de origem polimérica, seguido da queima do precursor e a pressurização com o metal liquido ou uma pasta de pó metálico que posteriormente é sinterizado; [Al, Mg, Ni-Cr, Aço-Inox, Cu]

V. Deposição de vapor ou electrodeposição do metal numa espuma de origem polimérica que é posteriormente queimada, deixando células fechadas no interior; [Ni,Ti]

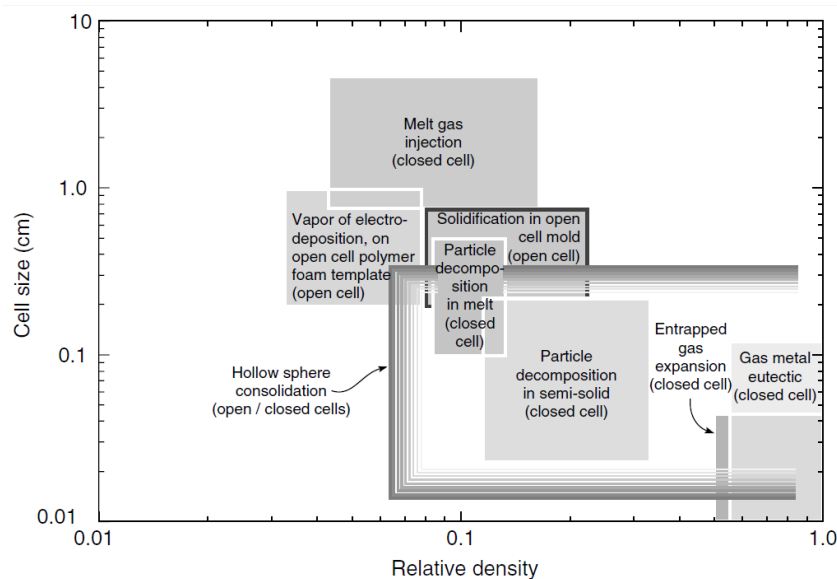
VI. Emprisionamento de um gás inerte a alta-pressão nos poros por uma pressão isostática (HIPing), seguido de uma expansão do gás a altas temperaturas; [Ti]

VII. Sinterização de esferas ocas produzidas através de um processo de atomização modificado; [Ni, Co, Ligas de Ni-Cr]

VIII. Compressão de um pó metálico misturado com um outro pó que depois de pressurizado solta-se da matriz metálica provocando um esqueleto em espuma metálica [Al, com sal a servir de aditivo]

IX. Dissolução de um gás (tipicamente Hidrogénio) no metal liquido sob pressão, permitindo a libertação controlada do gás durante a solidificação. [Cu, Ni, Al]

Estes são os processos conhecidos mais usuais na produção de espumas metálicas. No entanto, apenas os quatro primeiros métodos são usados a nível industrial, pelo que iremos detalhar cada um destes processos. Cada método pode ser usado na produção de certos tipos de materiais porosos ou celulares com as suas limitações quanto à densidade relativa e o tamanho



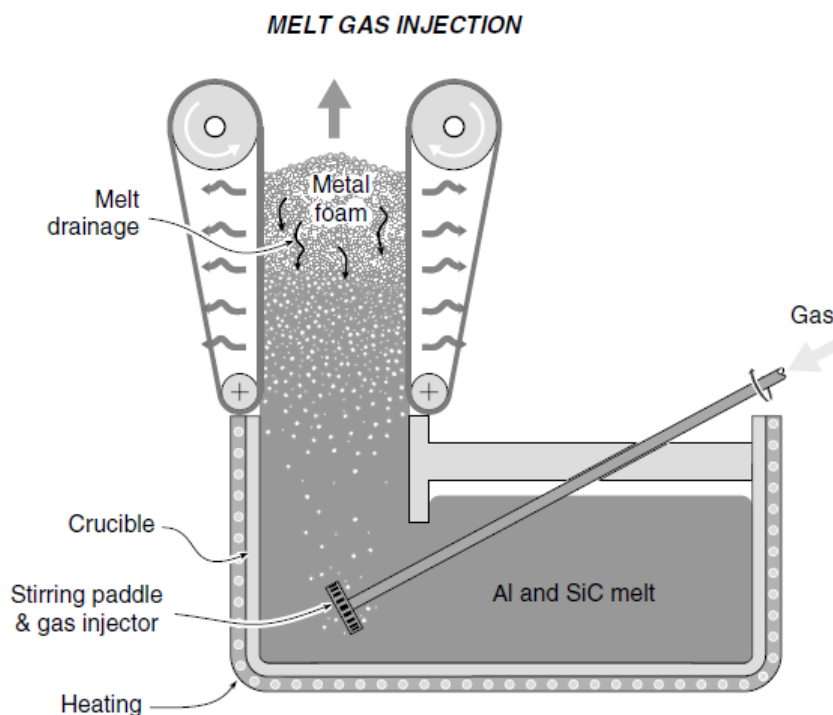
**Figura 11:** Diferentes processos de fabrico da espuma metálica. [19]

das células. No gráfico da figura 11 temos as diversas gamas de tamanhos de célula, tipos de célula e densidades relativas obtidas pelos diversos processos enunciados. [19]

#### I. Insuflação de ar através de uma liga metálica no estado liquido

No caso de metais puros a obtenção de espuma não um processo simples, uma vez que a espuma resultante não é suficientemente estável e colapsa antes do metal solidificar. Uma forma de combater este efeito é adicionar ao metal liquido pequenas particulas de óxido de aluminio de forma a aumentar a viscosidade do metal, e assim aumentar a estabilidade da espuma quando arrefecida. Este processo é o mais corrente para formar espumas de aluminio devido ao metal base (Al) apresentar baixa densidade e não oxida excessivamente quando o metal liquido é exposto ao ar ou outro gás que contenha oxigénio. [19, 20]

Existem diversas variantes deste processo, uma das quais está representada na figura 12.



**Figura 12:** Processo fabrico de insuflação de ar através de uma liga metálica no estado liquido.[19]

O aluminio puro ou ligado é fundido e em seguida adiciona-se 5 - 15 % de particulas cerâmica estabilizadora. Estas particulas, tipicamente de 0.5 – 25  $\mu\text{m}$  de diametro, podem ser de alumina, zirconia, silicio ou carbonetos. [19, 20]



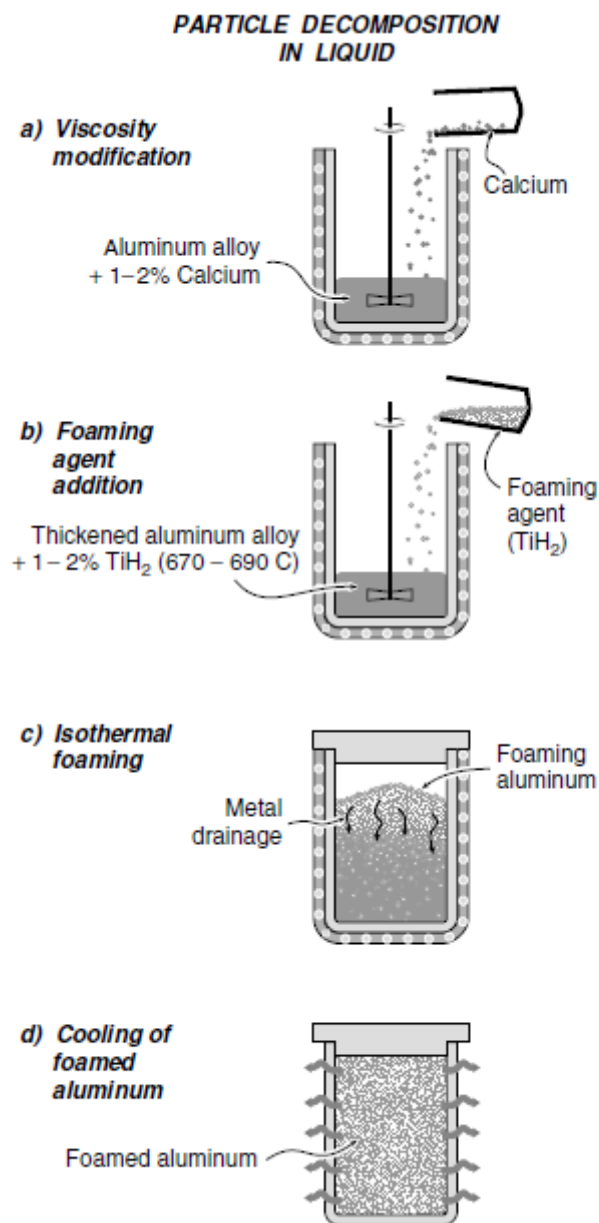
Existe uma grande variedade para criar bolhas dentro do alumínio líquido. O ar é o mais utilizado, no entanto, podem ser usados gases como dióxido de carbono, oxigénio, gases inertes e até água. As bolhas formadas por este processo boiam até à superfície do metal líquido, drenam todo o gás contido no material e em seguida começam a solidificar. As características da espuma resultante são controladas pela injeção do ar, do gradiente de temperatura, da velocidade de arrefecimento e da viscosidade do metal. [19]

Este processo é utilizado na produção de blocos de espuma metálica com dimensões até 2.44 x 1.22 x 0.42 metros e células fechadas de 5 a 20 mm de diâmetro. Inicialmente patenteado pela *ALCAN* (empresa canadiana de produção de alumínio) este método é actualmente utilizado pelas empresas *CYMAT* (também canadiana e especialista mundial na produção de espumas de alumínio) e *NORSK-HYDRO* (empresa norueguesa de produção de alumínio e mais recentemente com inovações no ramo das energias renováveis). [19, 20]

## II. Mistura de um agente no metal no estado líquido controlando a pressão no arrefecimento

Ligas metálicas podem ser transformadas em espuma através de um agente que liberta gás quando aquecido. O agente formador de espuma é o hidreto de titânio ( $\text{TiH}_2$ ) que, quando aquecido acima de 465°C, começa a decompor-se em Ti e num gás,  $\text{H}_2$ . Adicionando partículas de hidreto de titânio ao alumínio líquido, causará a rápida libertação de gás, criando bolhas que formarão espuma metálica de célula fechada. Analogamente ao processo anterior, a viscosidade do metal também terá de apresentar valores elevados. Uma viscosidade reduzida pode provocar a união das bolhas, criando assim uma estrutura de célula aberta. Para combater este efeito é adicionado cálcio quando o metal se encontra já no estado líquido. É possível controlar este processo através da manipulação da quantidade de agente utilizado, pelas condições de arrefecimento e pela pressão exterior. A espuma resultante deste processo tem células que variam de 0.5 a 5 mm de diâmetro e densidade relativa a variar entre 0.2 e 0.07. [19, 20]

O processo inicia-se pela fusão do alumínio e a sua estabilização a uma temperatura entre 670 e 690°C. A viscosidade é posteriormente aumentada com a adição de cálcio que rapidamente oxida e forma  $\text{CaO}$  e  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$  (Figura 13, a)). O metal líquido é rapidamente misturado e adiciona-se 1 a 2 % de hidreto de titânio na forma de partícula de 5 a 20  $\mu\text{m}$  de diâmetro (Figura 13 b)). Assim que as partículas estejam dispersas no metal líquido retira-se o misturador e a espuma pode assim ser formada na escória do metal (Figura 13 c)). Finalmente retira-se o aquecimento e



**Figura 13:** Processo fabrico de espuma metálica, mistura de um agente no metal no estado liquido controlando a pressão no arrefecimento.[19]

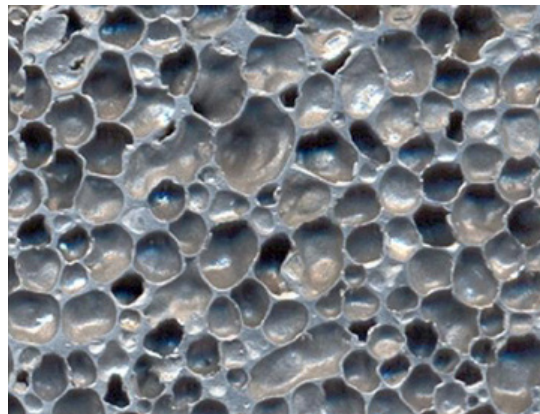
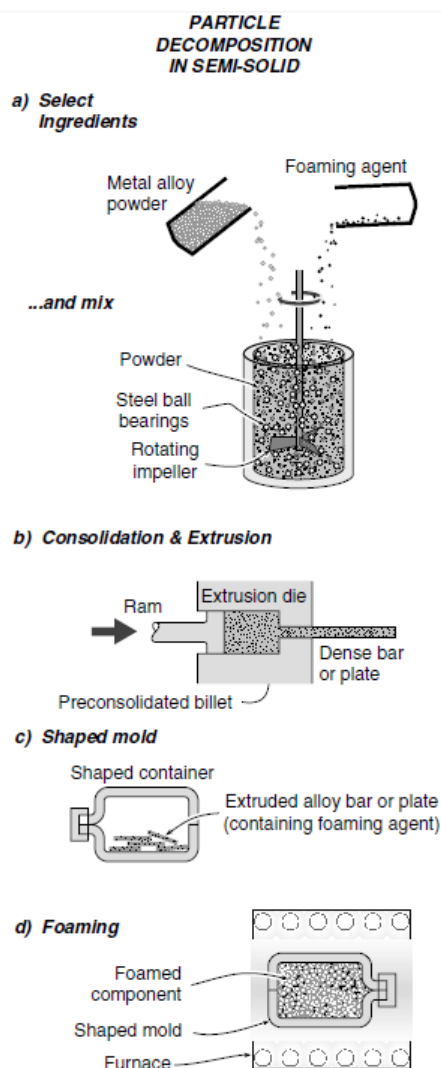
assim o metal começa a solidificar (Figura 13 d)).

Esta técnica foi desenvolvida pela *The Shinko Wire Company* (empresa japonesa perita em fabricar fios metálicos), e tem como nome do produto *ALPORAS*. [19]



### III. Consolidação de um pó metálico com um agente seguido de um aquecimento até que o agente liberte o hidrogénio contido nele, expandindo o material

Os agentes promotores de espuma podem ser introduzidos no metal mesmo no estado sólido. Hidreto de titânio, o agente mais utilizado na produção de espumas metálicas, começa a decompor-se a cerca de 465°C, que é bem abaixo do ponto de fusão do alumínio puro e suas ligas (aproximadamente 660°C). Este pressuposto levanta a possibilidade de criar espuma dispersando o agente no alumínio sólido, usando o 'powder metallurgy processo'\*. Em seguida aumenta-se a temperatura até permitir a libertação do gás e fundir total ou parcialmente o metal de forma a permitir os poros a crescer. Posteriormente um arrefecimento adequado permite que a espuma



**Figura 14:** Consolidação de um pó metálico com um agente seguido de um aquecimento até que o agente liberte o hidrogénio contido nele, expandindo o material.[19]

estabilize. Este processo foi desenvolvido por várias empresas. Nomeadamente a *IFAM* (instituto de investigação científica alemão), a *LKR* (instituto austriaco de investigação ligado à tecnologia de metais leves) e a *Neuman-Alu* (empresa austriaca especialista no desenvolvimento e produção de peças de alumínio de grande qualidade). [19]

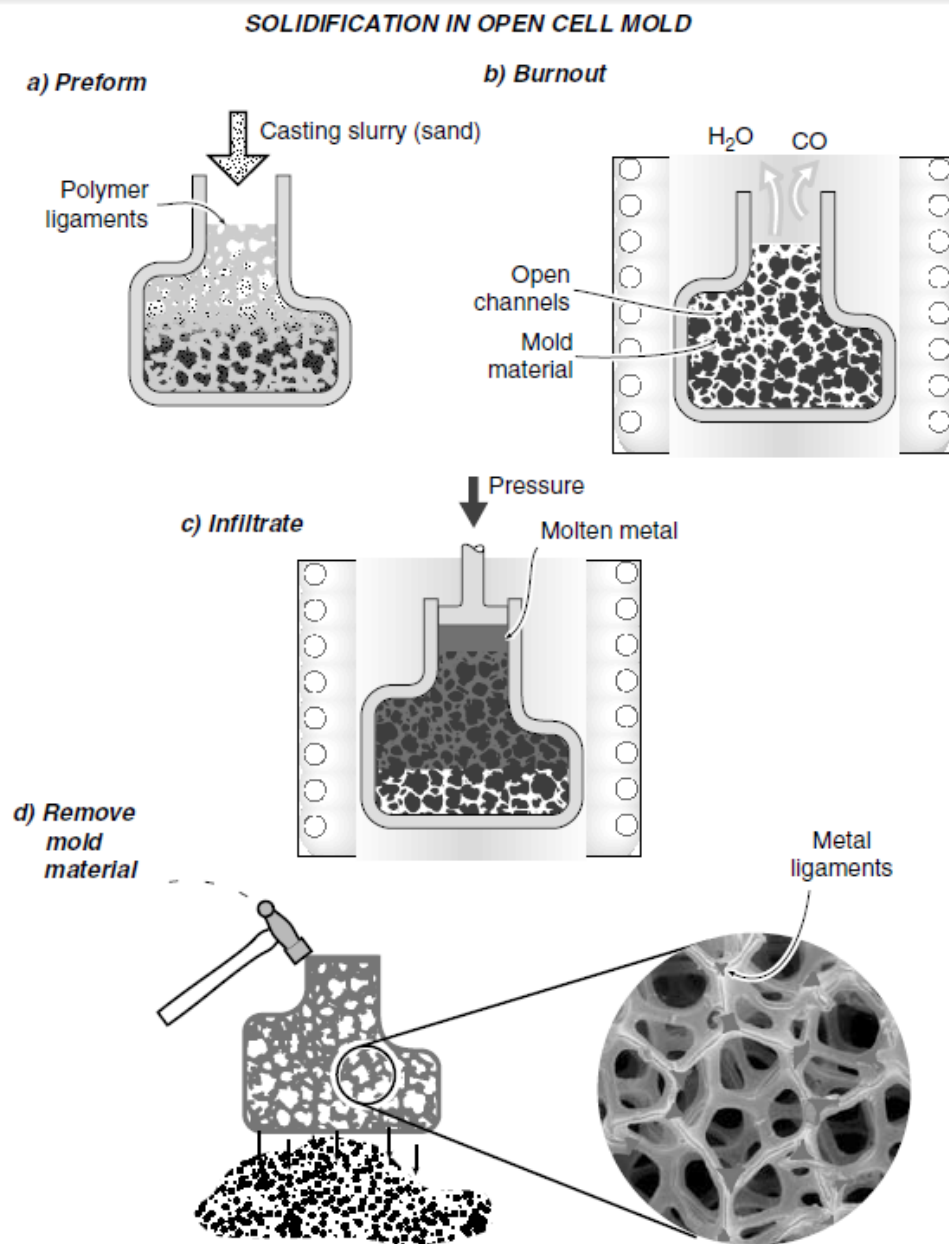
Na figura 14 mostra-se um diagrama esquemático da sequência de produção de espumas metálicas por este processo. Começa-se por misturar as partículas de hidreto de titânio ( $TiH_2$ ) com o pó de liga de alumínio (Figura 14, a)). Após a mistura completa dos ingredientes, ainda no estado sólido, é compactada e em seguida extrudida em pequenas barras ou placas, chamadas de precursores (Figura 14, b)). O precursor é então depositado num molde, onde é aquecido (Figura 14, c)). Este aquecimento, até temperaturas superiores à temperatura de fusão do alumínio, promove a libertação do gás, formando assim a espuma metálica (Figura 14, d)). [19]

Uma variante deste processo foi desenvolvida recentemente. O precursor é laminado entre duas faces metálicas, formando assim uma estrutura *sandwich* com um núcleo sólido. Este processo é vantajoso no ponto de vista da conformação plástica de estruturas *sandwich* devido ao núcleo ainda se encontrar no estado sólido e assim mais fácil de trabalhar. Finalmente aquece-se o material para formar a espuma. [19]

#### IV. Fundição usando um precursor de cera ou de origem polimérica como modelo – “Investment Casting”

Existe uma enorme gama de espumas poliméricas de densidade relativa baixa e com uma diversidade em tamanho das células. Estas espumas podem ser utilizadas como modelos para criar moldes para o processo de *investment casting*. Este método é usado pela *ERG* (empresa norte americana lider mundial na produção de espumas metálicas de célula aberta) para produzir componentes para indústria aeroespacial. [19]

Na figura 15 mostra-se esquematicamente os passos do processo de Investment casting. Primariamente é escolhida a espuma polimérica que servirá de molde. O molde é posteriormente revestido por uma barbotina cerâmica e em seguida pulverizado com partículas cerâmicas (Figura 15 a)). A carapaça cerâmica é então sujeita a um tratamento térmico de cozedura durante o qual o material polimérico se decompõe (Figura 15 b)) deixando vazios para o vazamento do metal fundido (Figura 15 c)). Finalmente o, após o vazamento e arrefecimento do metal, a carapaça cerâmica é abatida, obtendo-se a espuma metálica pretendida (Figura 15 d)). [18 - 20]



**Figura 15:** Processo de 'Investment Casting'[12]

Através deste processo pode-se obter espumas de praticamente todos os metais usados em fundição. O método produz espumas de célula aberta com tamanho de células na ordem 1 a 5 mm e densidade relativa não inferior 5%. É especialmente útil devido a permitir obter estruturas de elevada qualidade mesmo que o componente tenha geometrias complexas. [19]

### 3.5.4 APLICAÇÕES

As aplicações destes materiais têm vindo a aumentar ao longo dos anos nos diferentes sectores industriais à medida que as propriedades físicas, químicas, térmicas e mecânicas vêm sendo melhoradas. Geralmente a sua aplicação toma em atenção vários factores dependentes das diversas formas deste tipo de material: [20]

- i. Morfologia: estrutura da célula, percentagem de porosidades e distribuição do tamanho dos poros;
- ii. Metalurgia: Composição química e microestrutura;
- iii. Processo de fabrico: depende da geometria que se pretende obter;
- iv. Economia: custos envolvidos no processo e viabilidade para a produção em grande quantidade.

Contudo, a principal característica que define a aplicação destas espumas é a estrutura das células. Na figura 16 apresenta-se um diagrama que mostra as principais características para as diversas aplicações destes materiais.

Espumas de célula aberta são usadas usualmente na indústria química em filtros, reservatórios de armazenamento de fluidos, permutadores de calor, entre outras. Estas aplicações devem-se a factores como porosidade aberta, elevada área específica e baixa condutividade térmica e eléctrica. [20]

Por sua vez, as espumas de célula fechada, especialmente a que tratamos nesta tese, espuma de liga de alumínio, são usadas principalmente na indústria dos transportes. [20] No ramo automóvel a principal aplicação destes materiais incide sobre componentes ultra-leves, de absorção de energia e capacidade de isolamento sonoro. Tal como já referimos no capítulo anterior, a aplicação destes materiais num automóvel faz diminuir o consumo de combustível devido à diminuição do peso total, origina também o aumento de segurança dos passageiros.

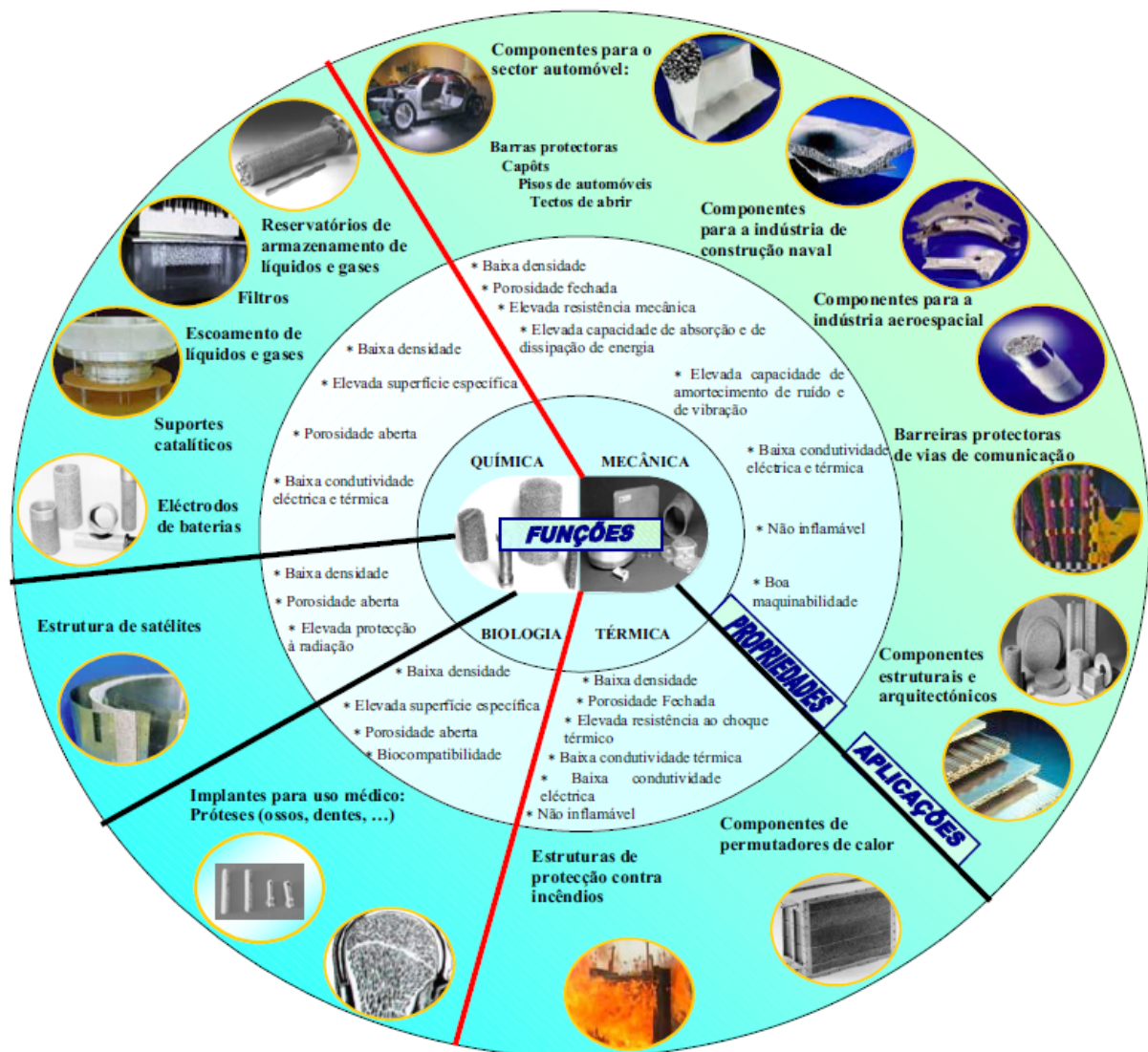


Figura 16: Aplicações, propriedades e funções das espumas metálicas. [20]

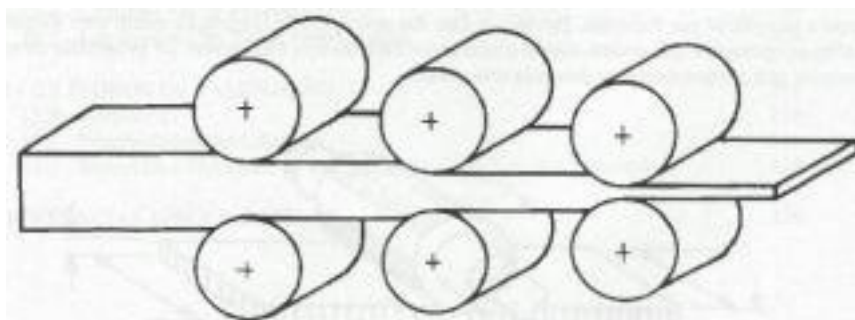
## 3.6 ESTRUTURA DA CHAPA DAS FACES

Numa estrutura *sandwich* as faces são normalmente caracterizadas por uma estrutura sólida homogênea plana, com uma dada espessura. Na presente tese estuda-se estruturas *sandwich* com faces de alumínio, pelo que este sub capítulo é incidido sobre estruturas de chapa de alumínio. [1]

O alumínio apresenta uma baixa resistência mecânica o que não permite ser aplicado directamente em solicitações onde a resistência à deformação e à fractura são fundamentais. Por estes motivos, podemos usar elementos de liga que alterem certas propriedades do metal base. Estes materiais denominam-se de ligas de alumínio.

### 3.6.1 PROCESSO DE FABRICO DA CHAPA

O alumínio é o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre, pelo que desde cedo se tentou perceber a potencialidade deste material, bem como a das suas diversas ligas. As ligas de alumínio são facilmente obtidas pelos diversos processos metalúrgicos devido ao seu baixo ponto de fusão, quando comparados com outras ligas metálicas. No entanto, a forma mais comum que este material é utilizado é sob a forma de chapa. Esta forma é obtida pelo processo fabrico de laminagem, que consiste num processo de deformação plástica, no qual o material é forçado a passar entre dois rolos (ou uma série de pares de rolos) que rodam no sentido oposto, com a mesma velocidade periférica, e estão separados entre si com uma distância ligeiramente inferior à espessura da chapa a obter. De notar que este processo é efectuado a temperaturas perto da temperatura de fusão do metal. Na figura 17 podemos ver uma ilustração do processo de laminagem.



**Figura 17:** Processo de Laminagem.



Aplicando este processo na obtenção de chapas vamos obter uma estrutura caracterizada por ter uma orientação preferencial, resultante do alongamento dos grãos na direção de laminagem. Este fenómeno, a anisotropia, é comum em praticamente todos os materiais obtidos por este processo. Como é expectável, este fenómeno irá influenciar o comportamento mecânico deste tipo de chapas, principalmente em processos de conformação plástica. [1]

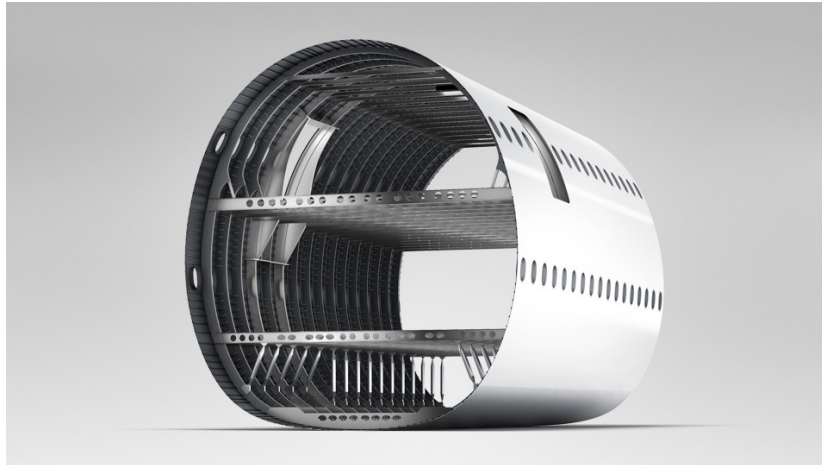
### 3.6.2 APLICAÇÕES

Como já tinha referido, o alumínio é o elemento mais abundante na crosta terrestre, pelo que a sua aplicação abrange os mais diversos componentes e objectos do nosso quotidiano. Devido à facilidade de conformar este metal, uma das principais utilizações é no fabrico de embalagens e utensílios de cozinha.



**Figura 18:** Latas de refrigerantes em Alumínio. [21]

Uma boa relação peso/resistência mecânica permite a este material ser utilizado na indústria dos transportes, oferecendo um menor consumo energético e menor desgaste. Para além destas características, o metal ainda apresenta ótima resistência à corrosão e é um bom condutor elétrico. Num avião comercial, este material representa cerca de 80% do peso total do avião. Em comparação com o material que era usado nas fuselagens dos aviões, em meados do século XX (madeira de balsa), o alumínio oferece maior rigidez para além de reduzir o peso para cerca de metade.



**Figura 19:** Fuselagem de uma aeronave em alumínio. [22]

Segundo o protocolo de Quioto, para cada quilograma de redução do peso de um automóvel há uma redução de 20Kg de emissão de carbono equivalente. Este pressuposto faz com que as carrocerias dos automóveis, que correspondem a uma grande parte do peso do automóvel, sejam neste momento construídas em alumínio, reduzindo assim o peso global significativamente e consequentemente a redução de emissões de poluentes.



**Figura 20:** Carroceria em alumínio do Jaguar XE. [23]



Também na construção civil este material é utilizado frequentemente. Sendo um material leve, resistente e versátil é utilizado geralmente em coberturas, fachadas de edifícios, revestimentos, condutas de ventilação e iluminação entre outras aplicações.



**Figura 21:** Algumas aplicações na construção civil de estruturas em alumínio. [24, 25]

## REFERÊNCIAS

- [1] Mata, Hélder T C, “Estudo de Estruturas Sandwich Hidroformadas Constituídas por Núcleo de Espumas Metálicas”, Tese de Doutoramento, FEUP, 2014, Porto
- [2] Pereira, Rui J B, Phd - “Análise estrutural de vigas sandwich de alumínio-aglomerado de cortiça”, 2014, Aveiro
- [3] Zenkert, D., The Handbook of Sandwich Construction, EMAS, Cradley Heath, 1997
- [4] <https://dir.indiamart.com/delhi/aluminum-sheets.html>

- [5] <https://store.acpsales.com/categories/1569/carbon-fiber-sheets>
- [6] M.F. de S. F. de Moura, A.M.B. de Moraes, and A.G. de Magalhães. Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico. Edições técnicas. Publindústria, 2005.
- [7] Carvalho, P., Analise do Comportamento Mecanico e Identificacao do Tipo de Falha em Estruturas Sandwich com Nucleos de Cortica, Tese de Mestrado, IST/UTL, Lisboa, 2008.
- [8] <http://www.archiexpo.com/prod/cel-components-srl/product-90136-838736.html>
- [9] <http://www.acecr.ir/ShowProduct.aspx?FID=5vcz+Ae6Vh0=>
- [10] <http://www.distributioninternational.com/Products/Building-Insulation/>
- [11] Belbute, P., Estudo do Comportamento em flexão de Vigas Compósitas Sandwich, Tese de Mestrado, IST/UTL, Lisboa, 2010
- [12] Kicki F. Karlsson and B. Tomas Åström. Manufacturing and applications of structural sandwich components. Composites Part A 28A, 1997.
- [13] Hexcel Composites - Honeycomb Sandwich Design Technology [on-line]. 2000.
- [14] Davies, J.M., Lightweight Sandwich Construction, Blackwell Publishing, 2001
- [15] Tekoglu, C., Size effects in cellular solids, Rijksuniversiteit Groningen, 2007.
- [16] <http://www.metalfoam.net/>
- [17] J. Banhart, M. F. Ashby, N. A. Fleck, MetFoam 99, International Conference on Metals Foam and Cellular Metals Structures, MIT Verlag, 14–16.6, Bremen, Germany, 1999.
- [18] Banhart, M. F. Ashby, N. A. Fleck, 2nd International Conference on Cellular Metals and Metal Foam technology – MetFoam200031 MIT Verlag, 14–16, Bremen, Germany, 2001.
- [19] MF Ashby et al., Metal foams: a design guide, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [20] Duarte, I., Espumas Metálicas – Processos de fabrico, Caracterização e Simulação Numérica, 2005, Porto.
- [21] <http://varejo.espm.br/2949/segmento-de-bebidas-impulsiona-aumento-na-venda-de-latinhas>
- [22] [http://www.walter-tools.com/en-us/industry\\_solutions/aerospace/fuselage/Pages/default.aspx](http://www.walter-tools.com/en-us/industry_solutions/aerospace/fuselage/Pages/default.aspx)
- [23] <http://aluauto.com.br/ciclo-fechado/>
- [24] <http://www.atualtoldos.com.br/coberturas-aluminio-campinas-sao-paulo.html>
- [25] <http://www.martinsoliveira.pt/pt/3/servicos>

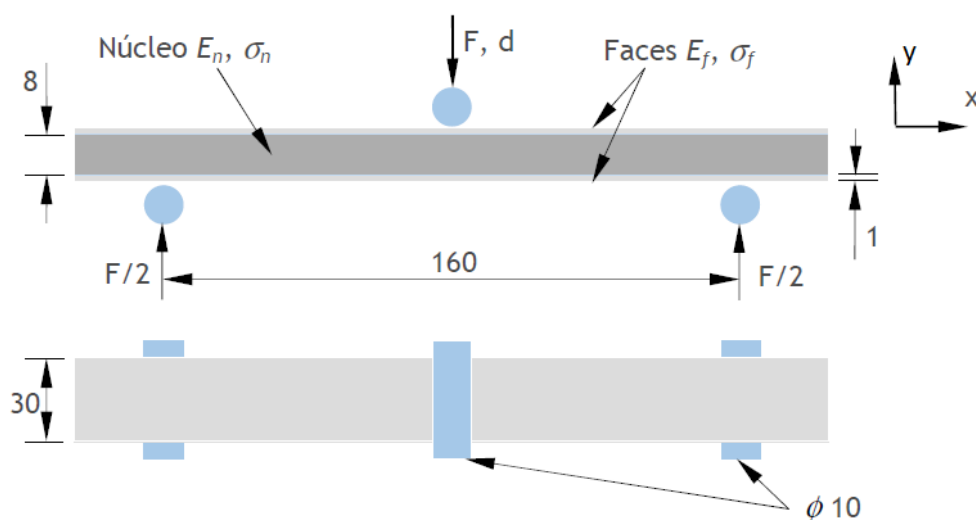
## 4. ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA ESTRUTURA SANDWICH

É reconhecida a alta resistência à flexão das estruturas *sandwich*. O afastamento das faces com a introdução da espuma metálica provoca um aumento do momento de inércia da estrutura originando um aumento significativo da resistência à flexão destas estruturas. Sendo esta característica uma das razões da utilização deste tipo de estrutura, como já havíamos visto.

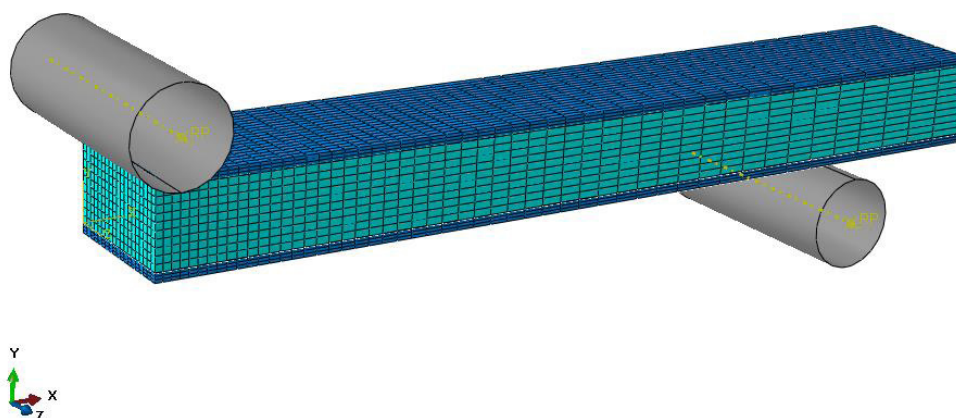
Neste capítulo iremos estudar o comportamento mecânico da estrutura *sandwich* para diferentes espessuras do núcleo de espuma metálica. Para tal foram efectuadas várias simulações numéricas em 'Abaqus' para dois tipos de ensaios de flexão. O primeiro, ensaio de flexão de 3 pontos, oferecerá uma perspectiva da evolução do comportamento mecânico com o aumento da espessura. O segundo, ensaio de flexão UCB (*Unconstrained cylindrical Bending*), irá consolidar os resultados obtidos no primeiro ensaio.

### 4.1 ENSAIO DE FLEXÃO DE TRÊS PONTOS

De forma a estudarmos o comportamento mecânico da estrutura *sandwich* efectuamos simulações numéricas do ensaio de flexão de três pontos. Este ensaio consiste na flexão de uma porção do painel, o provete, a meio vão, simplesmente apoiado como se pode verificar na figura 22. Os provetes utilizados para a simulação numérica tem como dimensão 200x30x10, variando a sua espessura de 10mm até 16mm, sempre com a mesma espessura das faces, 1mm. Os pontos de apoio do provete podem ser observados nas figuras 22 e 23, sendo que o punção e os apoios são caracterizados por superfícies cilíndricas rígidas com 10mm de diâmetro.



**Figura 22:** Configuração do ensaio de flexão de três pontos. [1]



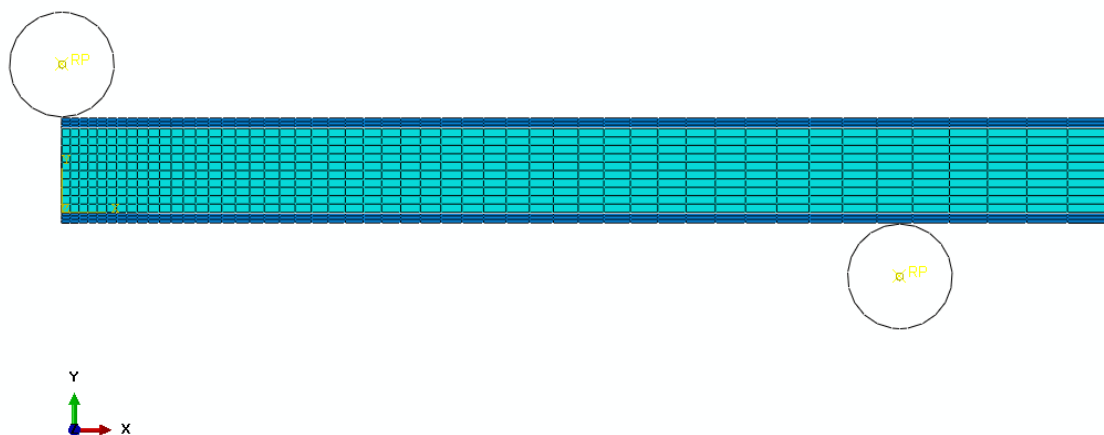
**Figura 23:** Modelo numérico - Ensaio de flexão de três pontos

Foram realizados quatro simulações numéricas para espessuras do núcleo entre 8-14mm, tendo sido registados os valores de força em função do deslocamento a meio vão, usando um deslocamento máximo aplicado de 25mm. A figura 22 mostra a configuração do ensaio a realizar. De forma a aumentar a rapidez computacional das simulações numéricas efectuadas utilizamos dois planos de simetria, visto que a geometria do provete nos permite. Como mostra a figura

23, o primeiro plano de simetria será o plano ZoY, simetria a meio vão. Podemos também utilizar uma outra simplificação, um corte no plano de simetria XoY, ficando assim  $\frac{1}{4}$  do provete para a modelação numérica.

A malha utilizada para as simulações numéricas é constituída por elementos C3D8RH para a espuma metálica e C3D8I para as faces. As siglas C3D8RH significam que são elementos Hexaédricos com 3 graus de liberdade com 8 nós, através de uma integração Reduzida e formulação Híbrida. Quanto às faces utilizamos elementos C3D8I, sendo que a sigla I neste caso significa modos Incompatíveis, que retrata melhor o comportamento à flexão de placas.

Como podemos observar na figura 24 foi utilizada uma ‘convergência’ na malha, com os



**Figura 24:** Detalhe da convergência da malha para o interior do provete.

elementos a meio vão do provete a serem mais pequenos que os elementos dos extremos. Esta característica vem na ótica de facilitar a computação da simulação numérica, visto que os resultados relevantes serão retirados a meio do provete. Quanto ao numero de elementos utilizado este difere de espessura para espessura, pelo que essa informação está contida na tabela seguinte:

Note-se que, como a espessura das faces se mantém, o numero de elementos que as

**Tabela 3: Numero de elementos utilizados na simulação numérica.**

Espessura do Núcleo [mm]	Nº Elementos da Chapa	Nº Elementos do Núcleo
8	2850	9500
10	2850	12350
12	2850	14250
14	2850	16150

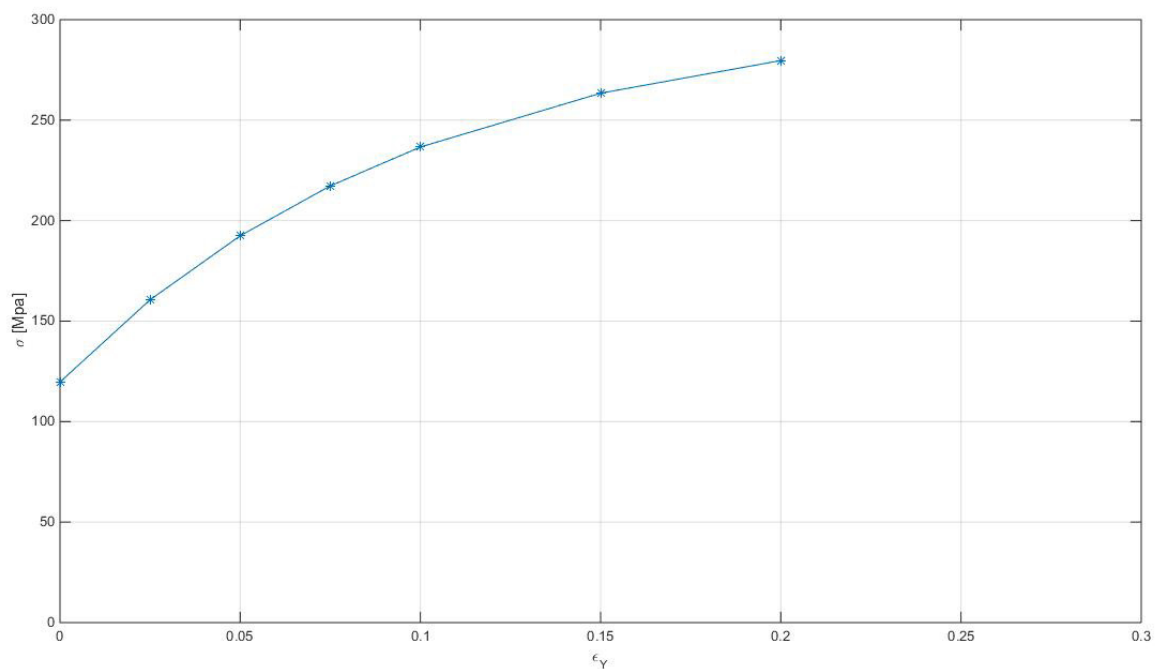
simulam é constante. Note-se também que este numero de elementos refere-se a apenas uma face, pelo que as faces correspondem a 5700 elementos.

Quanto à interface entre as faces e o núcleo foi utilizado o comando *\*Tie* disponível no 'Abaqus', para caracterizar o adesivo. Este comando não é uma aproximação real ao comportamento do adesivo, no entanto, como o objectivo desta tese não envolve aspectos de delaminação da estrutura, podemos utilizar esta ferramenta sem que os erros associados sejam significativos.

Relativamente às leis constitutivas e parâmetros relativos à modelação numérica do ensaio utilizou-se modelos de isotropia para o caso da espuma e das faces. Embora a isotropia não ser uma das características destas estruturas e materiais, a utilização deste pressuposto é uma boa aproximação para o caso de estudo em questão. Visto esta tese estar no seguimento de uma outra tese de doutoramento efectuada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto [1], as propriedades elásticas e plásticas da chapa e do núcleo já foram determinadas através de ensaios de tração e compressão para as faces e núcleo respectivamente. Os resultados dos ensaios de tração da chapa mostraram que, o alumínio EN AW 5754 apresenta as seguintes propriedades elásticas: [3]

**Tabela 4: Propriedades das faces em alumínio. [3]**

$E_c$ [GPa]	$\nu_c$	$\sigma_y$ [MPa]
70	0.33	118



**Figura 25:** Ensaio de tracção do alumínio EN AW 5754. [1]

Quanto ao comportamento plástico deste material pode-se caracterizar através da curva de tração obtida do ensaio:

Da curva de tração podemos verificar que o conjunto de pontos obtidos apenas caracteriza o comportamento plástico para pequenas deformações devido a fenómenos de fractura que ocorreram ao longo do ensaio. Para combater este problema foi usada a lei de Voce para ligas de alumínio de forma a caracterizar o material para deformações mais elevadas. No entanto para o objectivo desta tese este conjunto de pontos é suficiente para caracterizar o comportamento plástico das faces de alumínio.

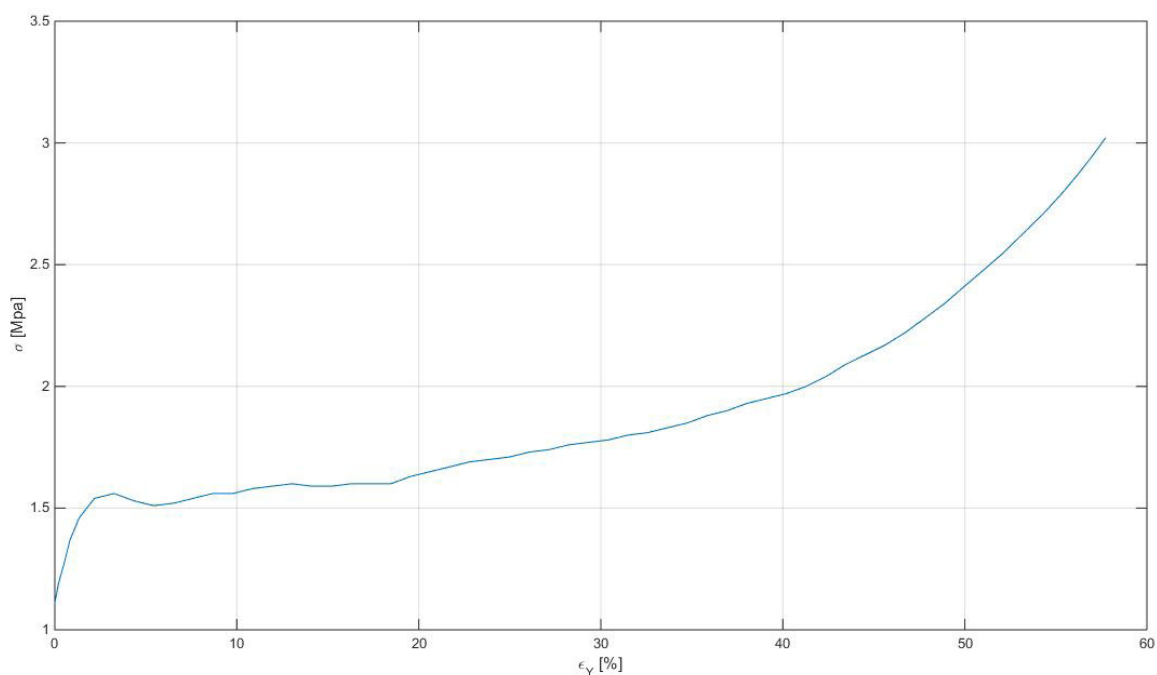
Quanto às propriedades do núcleo de espuma metálica, estas podem ser caracterizadas pelo ensaio de compressão uniaxial realizado na tese referida anteriormente e através do catálogo do fabricante. Na definição da componente elástica, o Módulo de Young (E) é obtido directamente através da curva de tensão/deformação obtida no ensaio de compressão, figura 25, sendo o seu valor  $E=0.79$  Gpa. O coeficiente de Poisson é fornecido pelo fabricante e tem como valor  $\nu=0.33$ . De forma a determinar as restantes constantes que caracterizam a espuma o autor [1] utilizou as seguintes expressões:

$$\alpha = \frac{3k}{\sqrt{9 - k^2}}$$

$$k = \sqrt{3(1 - 2\nu_p)}$$

De forma a determinar o modulo de compressibilidade (k) e o coeficiente de Poisson plás-

tico ( $\vartheta_p$ ) é necessário obter o valor do parâmetro que define a superfície de cedência ( $\alpha$ ). Através do modelo de Deshpande [2] retiramos o valor de  $\alpha$ , que para uma espuma de célula fechada com densidade relativa de 8,4% tem valor  $\alpha=2.08$  e 9.4% ( $\alpha=2.13$ ). Tendo a espuma a estudar uma densidade relativa de 9% foi extrapolado a partir da espuma com 8.4% e 9.4% obtendo-se  $\alpha=2.11$ . Ficam assim definidas as propriedades da espuma utilizadas na simulação numérica:



**Figura 26:** Curva de tensão - deformação ensaio de compressão da espuma metálica. [3]

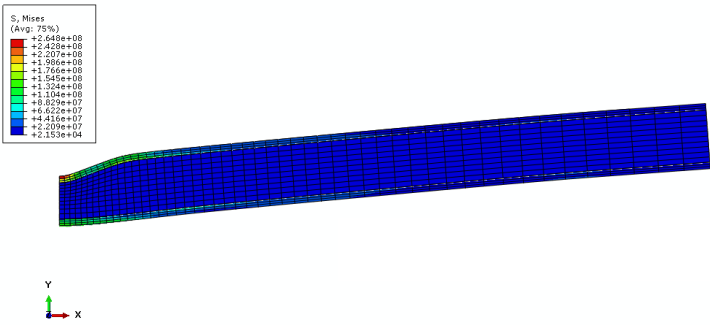
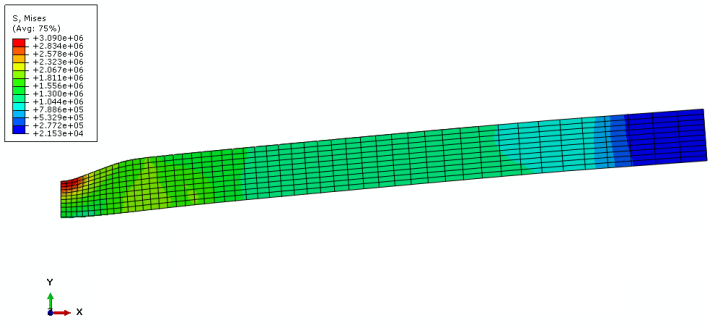
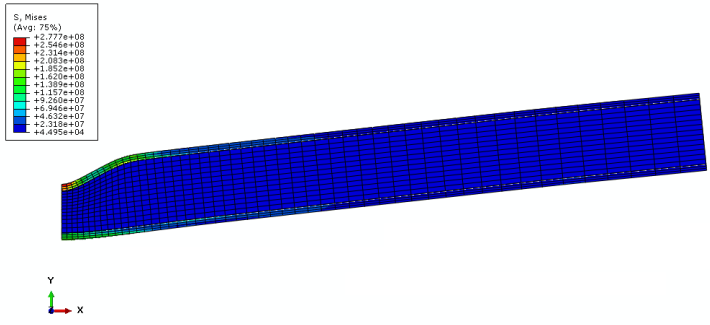
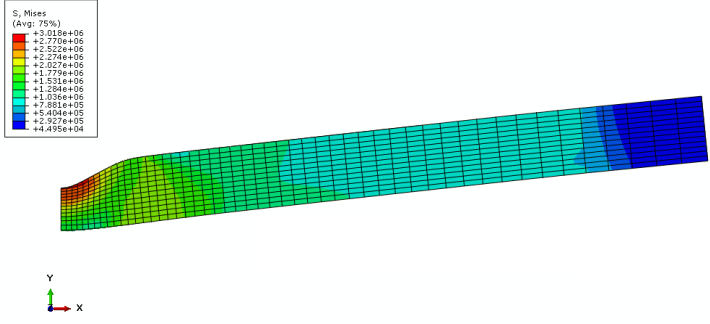
Definidas todas as propriedades das faces e do núcleo, bem como as características do ensaio de flexão de três pontos, procedemos à simulação numérica do ensaio para as espessuras do núcleo de 8, 10, 12 e 14 mm. Os resultados da simulação numérica podem ser vistos na tabela 6, com especial atenção para a deformada do provete e a força máxima a que este foi sujeito. O peso do provete é de especial interesse para o objectivo desta tese pelo que a sua informação também está presente na tabela. Intrinsecamente, o momento de inércia segundo zz também é relevante referir de forma a demonstrar o aumento de resistência à flexão da estrutura *sandwich*.

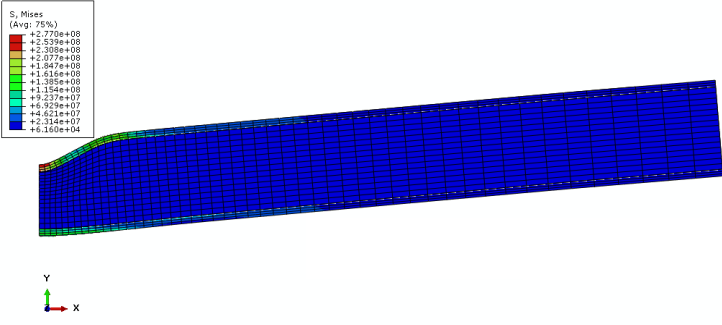
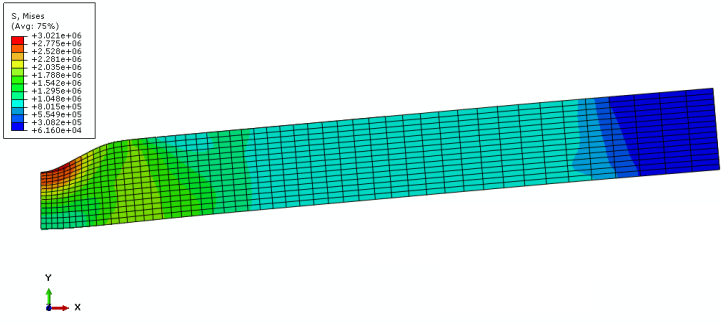
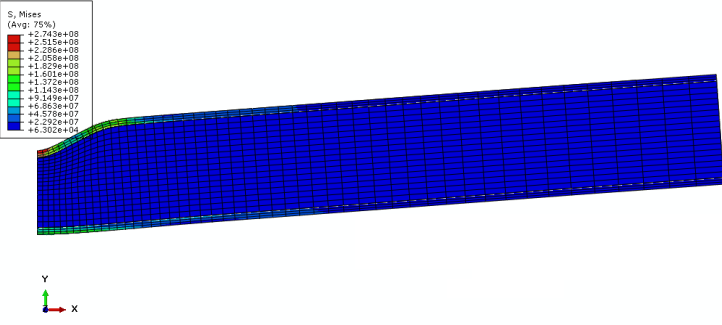
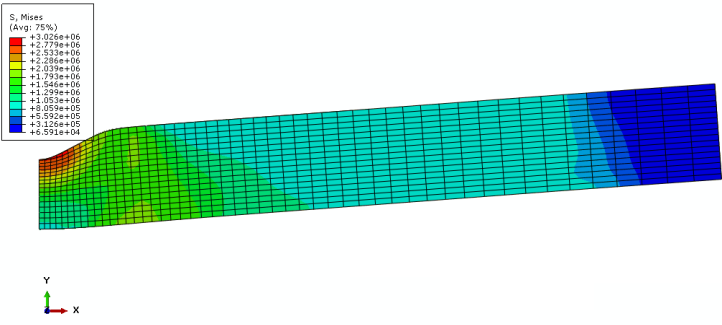
**Tabela 5: Constantes elásticas e plásticas da espuma metálica de célula fechada (ALPORAS) [3]**

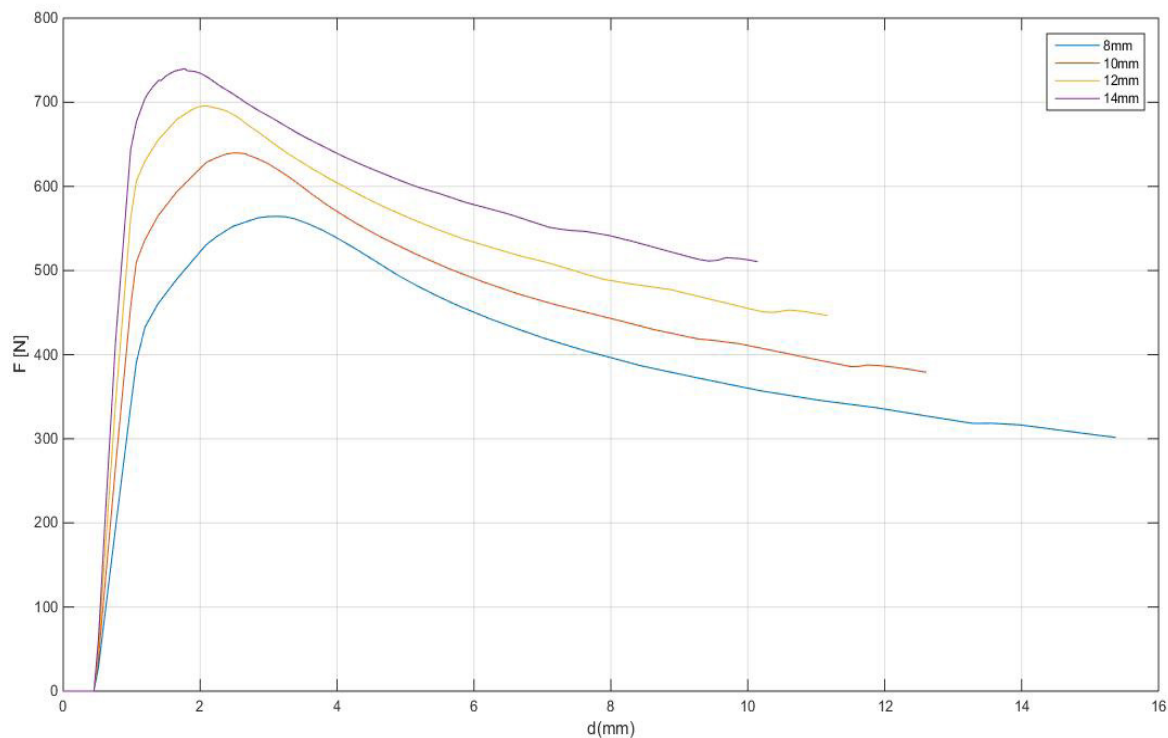
	E [GPa]	$\vartheta$	k	$\vartheta_p$
Elástico	0.79	0.33	-	-
Plástico	-	-	1.73	0.004



Tabela 6: Deformadas da simulação numérica

Espessura do núcleo	Deformada	Força máxima
8mm		564 N (m=44 g) $I_z=2.5 \times 10^{-9} \text{ m}^4$
		
10mm		640 N (m=47 g) $I_z=4.3 \times 10^{-9} \text{ m}^4$
		

Espessura do núcleo	Deformada	Força máxima
12mm		696 N (m=50 g) $I_z=6.86 \times 10^{-9} \text{ m}^4$
		
14mm		740 N (m=53 g) $I_z=10.24 \times 10^{-9} \text{ m}^4$
		



**Figura 27:** Curva força - deslocamento obtida pela simulação numérica.

As simulações numéricas efectuadas abrangem apenas quatro espessuras devido à sua produção. Isto é, a produção destes painéis com espessura do núcleo acima de 15mm envolve um aumento da espessura das faces, enquanto que espessuras mais baixas que 8mm envolve uma espessura das faces menor que 1mm. De maneira a podermos analisar a influência do aumento da espessura do núcleo em função do comportamento à flexão da estrutura sandwich optamos por manter todos os parâmetros iguais, modificando apenas a configuração do núcleo.

O gráfico da figura 27 representa a evolução da força aplicada com o deslocamento vertical do provete. Como podemos verificar, o aumento da espessura do núcleo provoca um aumento na resistência à flexão da estrutura sandwich. Esta característica seria de esperar, visto que o aumento da espessura da estrutura provoca um aumento do seu momento de inércia e consequentemente o aumento da sua resistência à flexão. De notar que para um deslocamento inferior a 0.25mm a força aplicada é zero. Esta característica é devido ao afastamento inicial do punção que exerce a força relativamente ao provete a ser ensaiado. Uma característica importante a ter em conta nestes resultados é a diminuição da componente plástica com o aumento da espessu-

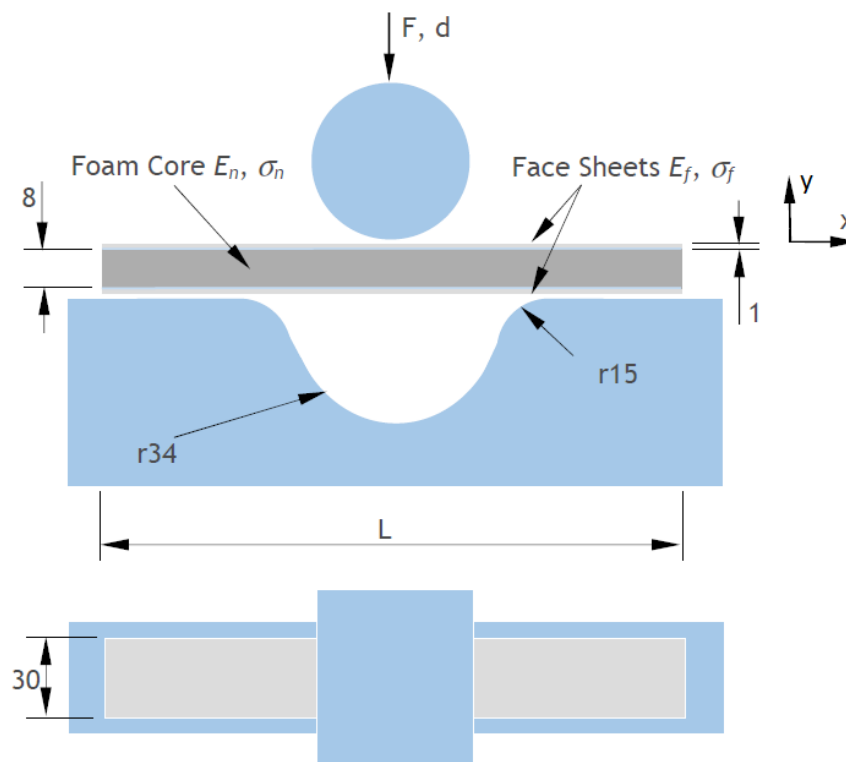
ra do núcleo em espuma metálica. Ou seja, a componente elástica aumenta, consequência da contribuição da espuma metálica, no entanto o comportamento plástico fica prejudicado, dando origem a quebra da estrutura para deslocamentos inferiores. Em termos de conformação plástica é necessário encontrar um balanço acertado entre a rigidez necessária e a espessura mínima, visto que para espessuras elevadas estes processos não são compatíveis.

Posteriormente iremos analisar mais detalhadamente o aumento da rigidez da estrutura em função do aumento de peso associado às diferentes espessuras do núcleo.

## 4.2 ENSAIO UCB

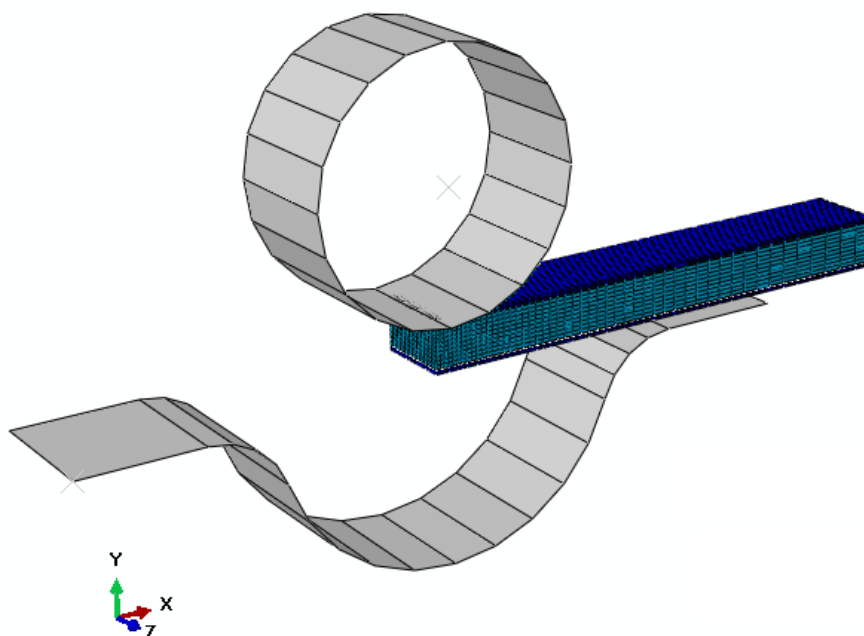
O ensaio de flexão cilíndrica UCB (*Unconstrained Cylindrical Bendig*, Numisheet 2002 Benchmark Problem) é bastante semelhante ao ensaio anterior. Neste caso o provete é flectido sobre uma matriz semi cilíndrica em vez dos dois punções estáticos (apoios) do ensaio de flexão de três pontos. Apesar de ambos os ensaios serem semelhantes, este é principalmente utilizado para o estudo da conformação plástica de chapas, bem como conduz a melhores resultados numéricos.

A figura 28 mostra a configuração do ensaio de flexão cilíndrica, neste caso a punção que provoca o deslocamento tem um diâmetro de 50 mm. A matriz semi cilíndrica tem um raio de 34 mm e dois raios de concordância de 15 mm. Os provetes utilizados para a simulação numérica deste ensaio são iguais aos do ensaio de flexão de três pontos, 200x30x10 variando a espessura até aos 16mm. As espessuras das faces são constantes para todos os provetes, 1 mm.



**Figura 28:** Configuração do ensaio UCB. [1]

A configuração deste ensaio provoca no provete um outro tipo de estado de tensão, permitindo identificar outros fenômenos que podem comprometer a integridade da estrutura, como por exemplo o caso de separação de camadas ou delaminação. Contudo este fenômeno não tem interesse para o objectivo desta tese, pelo que iremos novamente caracterizar o adesivo com o comando *\*Tie* presente no 'Abaqus'. Esta restrição considera a interface entre a espuma e a face sem separação nem deslizamento em qualquer altura da simulação.



**Figura 29:** Modelo numérico - ensaio UCB

Nesta simulação numérica utilizamos novamente os planos de simetria utilizados no ensaio de flexão de três pontos, simulando assim  $\frac{1}{4}$  do provete. Devido aos provetes serem iguais para ambas as simulações, quer o numero de elementos, quer o tipo de elementos utilizados serão os mesmos. Ou seja, elementos C3D8RH para o núcleo de espuma metálica e elementos C3D8I para as faces. É sabido que o adesivo tem um papel fundamental na integridade estrutural da *sandwich*, pelo que, como o adesivo ficou caracterizado como uma ligação rígida, os resulta-

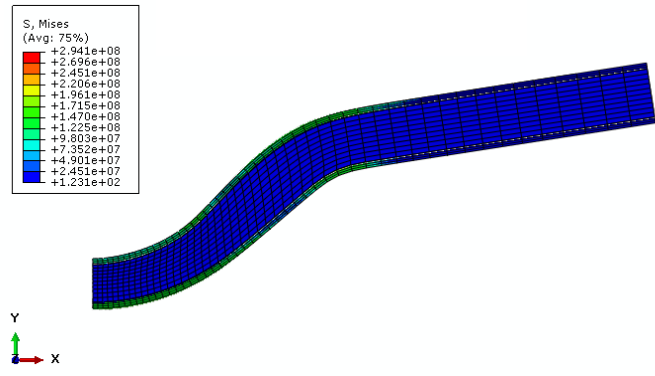
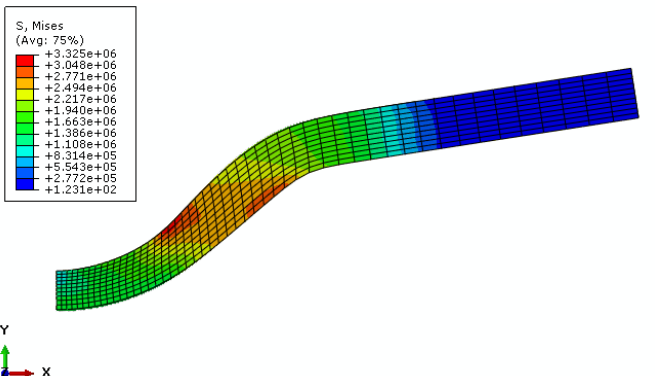
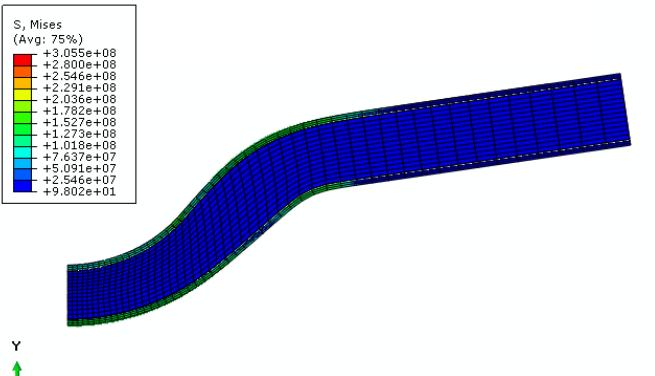
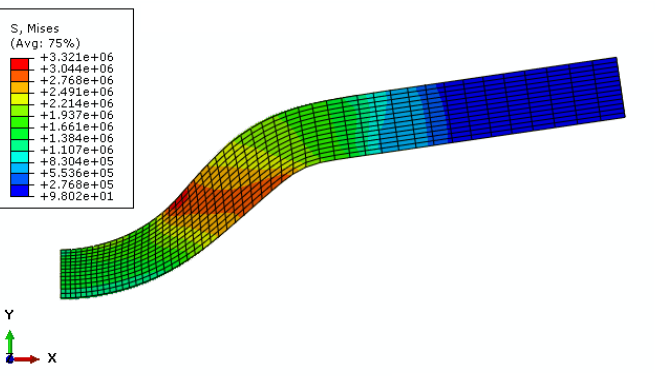
dos desta simulação podem apresentar erros associados significativos. No entanto, como poderemos ver mais adiante nesta tese, esses erros não influenciam muito nos resultados que são pretendidos para o objectivo desta tese.

Relativamente aos parâmetros dos materiais na modelação numérica, estes são precisamente os mesmos utilizados na simulação anterior. É de especial interesse manter todos os parâmetros iguais de forma a podermos comparar os resultados obtidos nesta simulação com a simulação do ensaio de flexão de três pontos. Os modelos usados baseiam-se na isotropia das faces e do núcleo, como já havíamos referido.

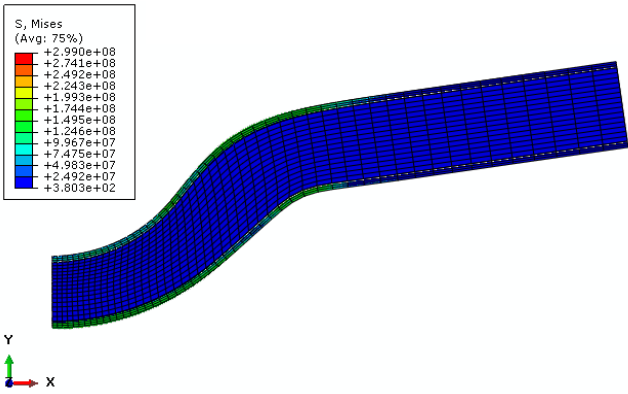
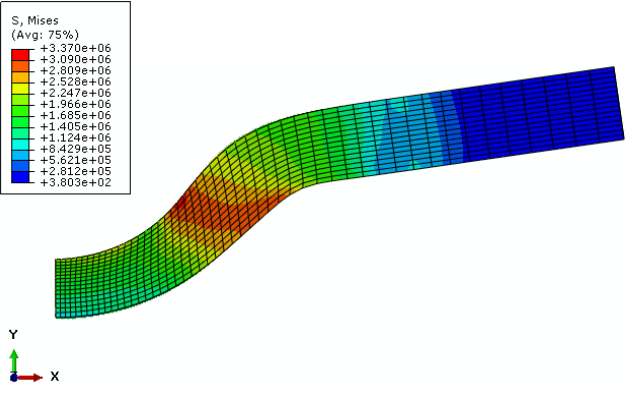
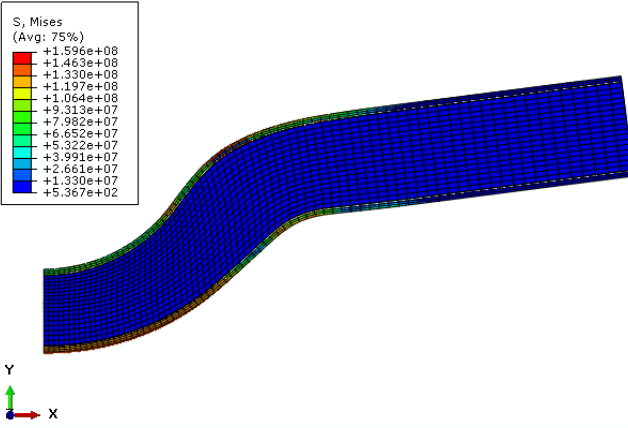
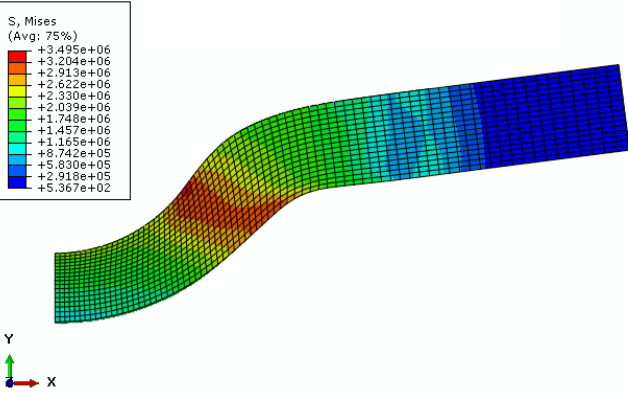
Na montagem do ensaio é necessário tomar em atenção algumas considerações. Tal como na simulação anterior, a punção e a matriz semicilíndrica estão afastadas do provete por uma distância muito pequena, cerca de 0.2 mm. Este passo é de extrema importância, visto que na simulação numérica o programa necessita de encontrar o contacto antes de começar a deformar o provete. Este procedimento será visível mais adiante na demonstração dos resultados desta simulação numérica. A punção neste ensaio irá deslocar-se uma distância máxima de 25 mm.

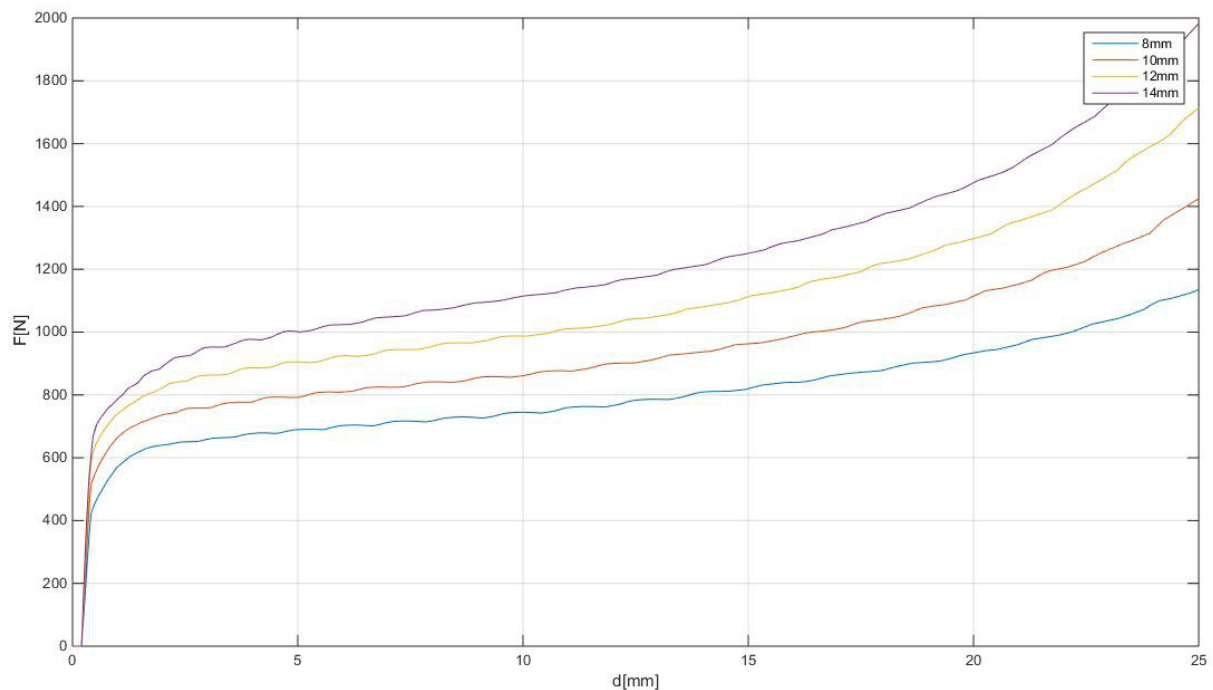
Foram então efectuadas quatro simulações numéricas dos provetes com 10, 12, 14 e 16 mm de espessura, com espessuras do núcleo de espuma metálica de 8, 10, 12 e 14mm respectivamente. Os resultados obtidos estão demonstrados no gráfico da figura 30, bem como as respectivas deformadas na tabela 7.

Tabela 7: Deformadas da simulação numérica do ensaio UCB.

Espessura do núcleo	Deformada	Força máxima
8mm		<p>1132 N (m=44 g) <math>I_z = 2.5 \times 10^{-9} \text{ m}^4</math></p>
		
10mm		<p>1424 N (m=47 g) <math>I_z = 4.3 \times 10^{-9} \text{ m}^4</math></p>
		

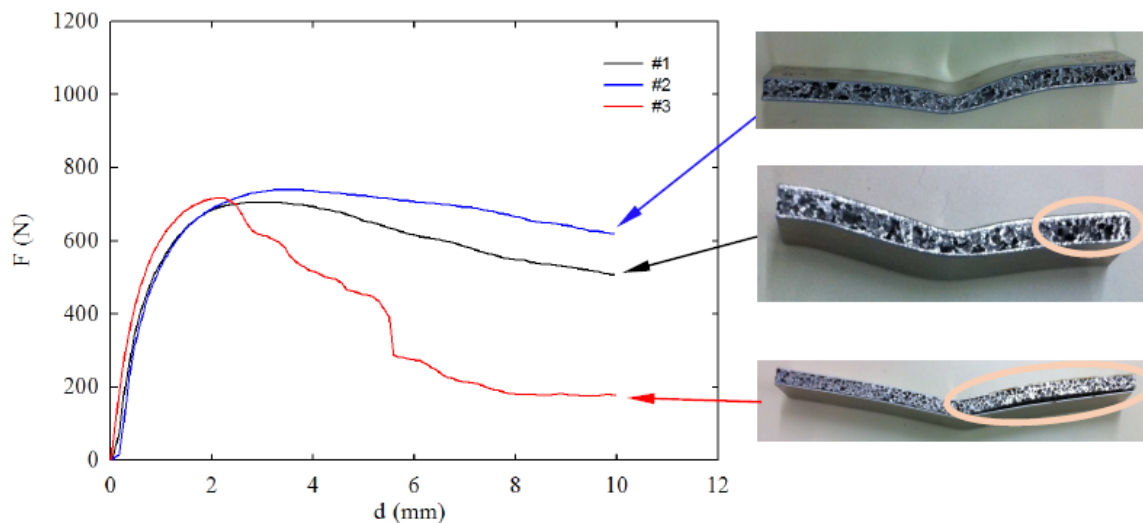


Espessura do núcleo	Deformada	Força máxima
12mm		1720 N (m=50 g) $I_z = 6.86 \times 10^{-9} \text{ m}^4$
		
14mm		1980 N (m=53 g) $I_z = 10.24 \times 10^{-9} \text{ m}^4$
		



**Figura 30:** Resultados do ensaio UCB. Curva força - deslocamento.

O gráfico da figura 30 mostra o andamento da força aplicada em função do deslocamento provocado pelo punção cilíndrico. Como já referimos anteriormente, estes resultados não contêm os problemas associados com a falha do adesivo. Caso fosse considerado o adesivo com elementos coesivos as curvas obtidas no gráfico da figura 29 poderiam apresentar quebras, provocadas pela separação das faces com o núcleo. Após a separação o comportamento da estrutura *sandwich* passaria a ser o comportamento de apenas as das faces, o que provocaria uma acentuada diminuição da força aplicada. Este problema pode ser visto nos resultados obtidos na tese do Hélder Mata (FEUP,2015), figura 31. [1]



**Figura 31:** Ensaio UCB realizado em 2014. Detalhe de separação de camadas. [1]

No caso da figura 31 os provetes ensaiados tem de espessura 10 mm, variando o comprimento dos provetes, para um deslocamento máximo de 10mm. Os comprimentos dos provetes são, respectivamente, 114, 167.5 e 230 mm. Podemos ver claramente o problema de separação de camadas e o que provoca nos resultados. Uma das conclusões obtidas da análise dos resultados é o facto de a cedência do compósito dar-se de uma forma aleatória.

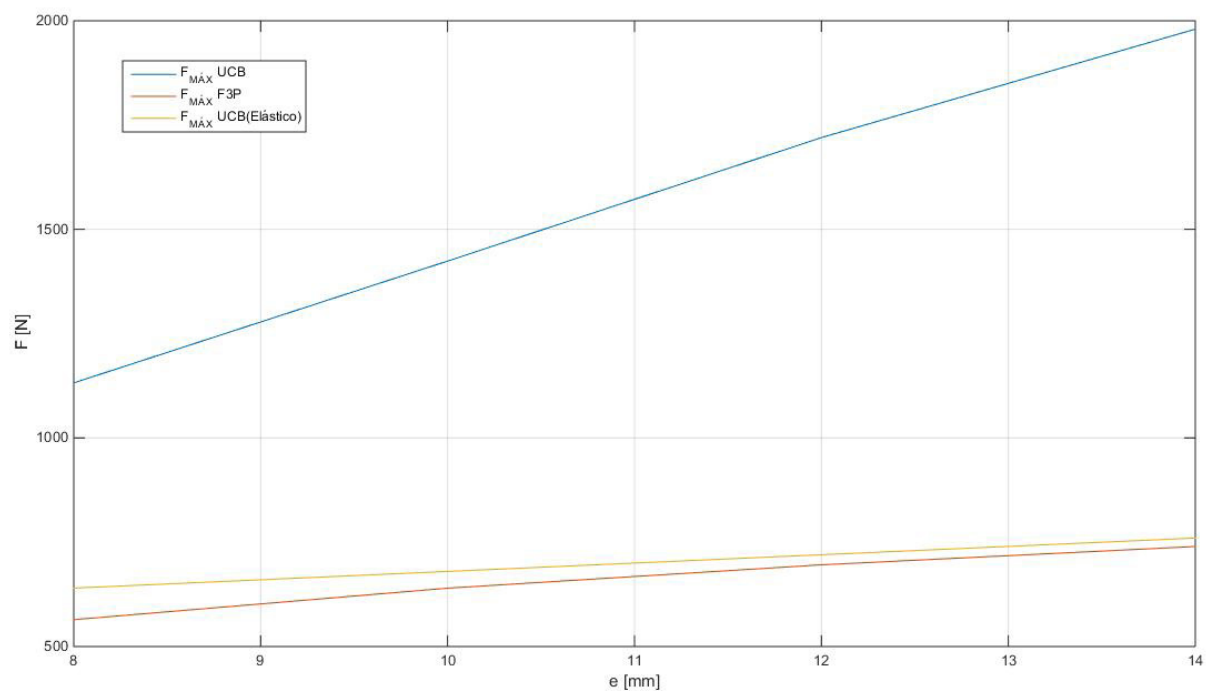
*‘Tal pode ser explicado pela irregularidade estrutural da espuma do núcleo, uma vez que, aparentemente a cedência da estrutura sandwich ocorre em zonas onde a espuma apresenta células com vazios de maiores dimensões’.* [1]

No entanto, para o objectivo desta tese este problema pode ser desprezado, apesar de ter uma importância relevante na utilização deste tipo de estruturas *sandwich*, bem como na sua conformação plástica. O mais relevante a reter da análise dos resultados obtidos das simulações numéricas dos vários provetes é o aumento da rigidez da estrutura com o aumento da sua espessura nuclear (a parte relevante dos resultados é a componente elástica, no entanto, como o andamento da componente plástica é igual para todos os ensaios, podemos utilizar as forças máximas aplicadas para estudar a influência do aumento da espessura nuclear). Em termos de conformação plástica podemos verificar nas tabelas 7 que as tensões das faces crescem significativamente de ensaio para ensaio, o que não é nada desejável no processo. Podendo aparecer tensões residuais após a conformação bem como o retorno elástico pode ser tal que o processo seja um fracasso.

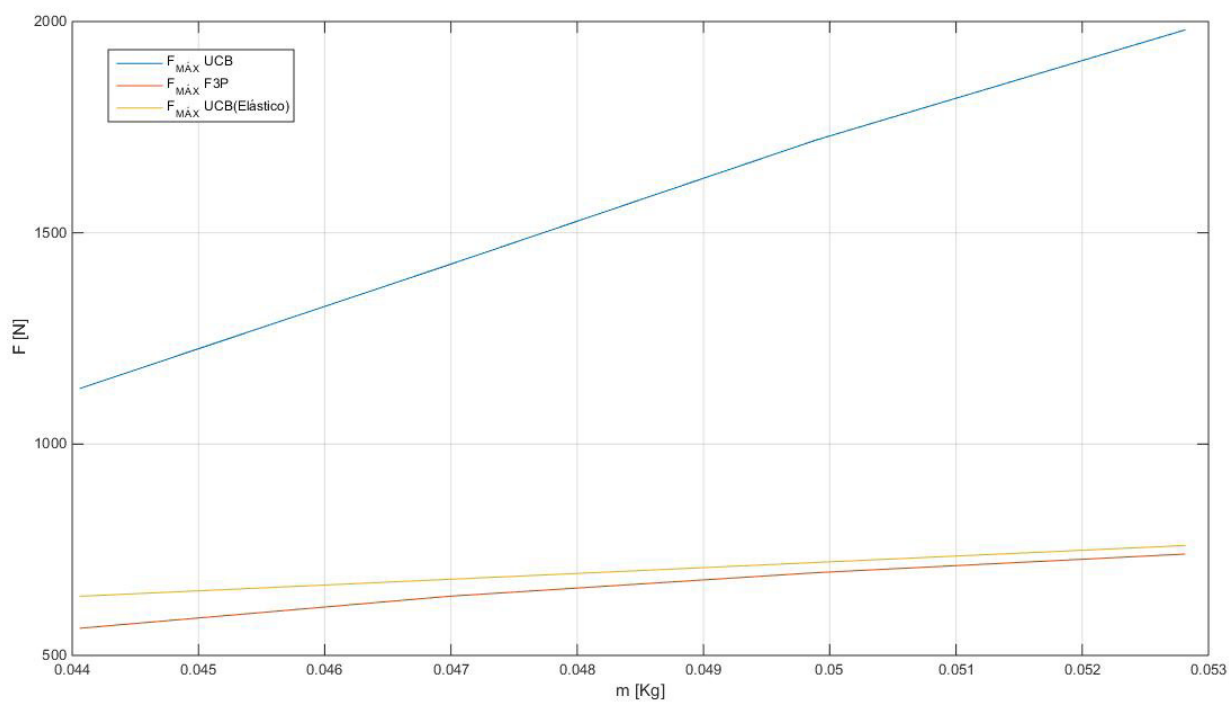
### 4.3 COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Obtidos os resultados das simulações numéricas podemos efectuar um balanço do aumento de rigidez estrutural em função dos problemas associados ao aumento da espessura do núcleo. Sendo estas estruturas caracterizadas por apresentarem pesos reduzidos em comparação com estruturas da mesma gama de rigidez, será expectável que o aumento da espessura do núcleo não aumente significativamente o peso total da estrutura *sandwich*. Uma análise ao aumento de peso provocado pelas diferentes espessuras pode ser efectuado. Analisando a estrutura com 8 mm de espessura do núcleo temos 0.044064 Kg, aumentando a espessura para 10 mm temos um aumento do peso para 0.046980 Kg. De notar que estes valores são para um provete com as dimensões utilizadas nas simulações dos ensaios. De forma a podermos analisar realmente o aumento de peso teremos de calcular a percentagem de aumento de peso relacionado com as diferentes espessuras. O aumento de 8 mm para 10 mm de espessura do núcleo fará que a estrutura aumente o seu peso em 6.6%, estas percentagens diminuem à medida que se aumenta para 12 e 14 mm, 6.2 e 5.8%, respectivamente. Isto deve-se ao facto de estarmos apenas a aumentar a espessura da espuma metálica, que tem uma densidade muito inferior às faces. Faces estas que contribuem para o peso da estrutura sempre com a mesma quantidade, pelo facto de não alterarmos a espessura das chapas. Numa aplicação deste tipo de estruturas em que a contribuição do seu peso seja 10 Kg (os 2 painéis dianteiros de um automóvel por exemplo), um aumento de 10 mm de espessura do painel para 12 mm provocará um aumento de peso de cerca de 660 g. Com isto fica claro que, caso seja necessário uma estrutura mais rígida podemos optar por uma espessura de painel maior, com a segurança que o aumento de peso associado não é muito significativo. No entanto, como poderemos ver mais à frente, o aumento da espessura da estrutura provocará outros problemas associados, a mais pertinente relacionada com a dificuldade da conformidade plástica deste tipo de estruturas *sandwich*.

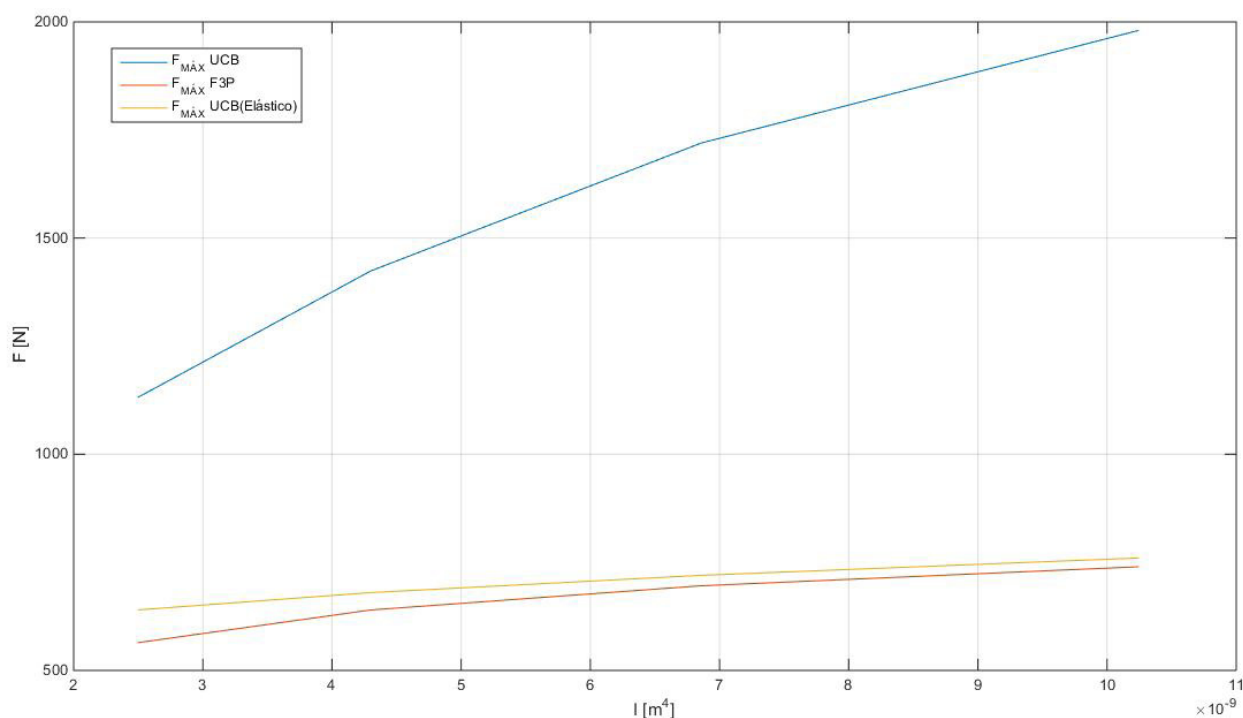
Relativamente ao aumento da rigidez dos painéis, os gráficos das figuras 32, 33 e 34 mostram o andamento da força máxima com as diferentes espessuras do núcleo, peso e momento de Inércia segundo z. Nos gráficos estão contidos os resultados das simulações numéricas dos ensaios de flexão realizados. De notar que na legenda dos gráficos os resultados do ensaio de flexão em três pontos é denotada pela sigla - F3P.



**Figura 32:** Gráfico Força máxima - espessura dos resultados das simulações numéricas



**Figura 33:** Gráfico Força máxima - peso dos resultados das simulações numéricas.



**Figura 34:** Gráfico Força máxima - momento de inércia dos resultados das simulações numéricas.

Já havíamos referido que o aumento da espessura do núcleo ( $e$ ) provocará um aumento do peso da estrutura ( $m$ ) não linear, no entanto, como podemos verificar da análise dos gráficos I e II, as curvas são praticamente idênticas. Isto deve-se ao facto do aumento do peso ser praticamente insignificante, na ordem dos 5%. Analisando o gráfico III podemos verificar que, no caso da comparação da força com o momento de inércia ( $I$ ) da estrutura, as curvas tem um andamento diferente, visto que o aumento da espessura do núcleo provoca um aumento do momento de inércia ( $I$ ) grande. Por exemplo, para uma espessura nuclear de 8 mm temos  $I_z = 2.5 \times 10^{-9} \text{ m}^4$  enquanto para 10 mm temos  $I_z = 4.3 \times 10^{-9} \text{ m}^4$ , este aumento é de cerca de 72%. Aumentando de 10 para 12 mm a espessura do núcleo provocará um aumento de 60% e de 12 para 14 mm, um aumento de 50%. Verificamos que para espessuras mais baixas, um pequeno aumento da mesma provoca um grande aumento do momento de inércia.

Relativamente à rigidez da estrutura os resultados comprovam o que seria esperado, um aumento da sua rigidez com um aumento da espessura do núcleo de espuma metálica. Analisando os resultados do ensaio de flexão de três pontos verificamos um aumento de 564 N de força máxima no ensaio ao provete com 8 mm de espessura para 640 N no ensaio ao provete com 10 mm de espessura. Este aumento é de cerca de 14%, diminuindo com o progressivo aumento da

espessura para 12 e para 14 mm, respectivamente, 8.8% e 6.3%. Isto é, para a mesma variação de espessura, o aumento da rigidez da estrutura é maior para valores de espessura menores. Esta característica é o espelho do aumento da elasticidade da estrutura, no entanto, o comportamento plástico da estrutura deteriora com o aumento da espessura do painel. Tal como verificamos na análise do gráfico da figura 27 a cedência plástica da estrutura dá-se para deslocamentos menores, à medida que aumentamos a espessura no núcleo.

Os resultados do ensaio UCB vem confirmar o que referimos da análise da simulação numérica do ensaio de flexão de três pontos. Isto é, o aumento da componente elástica da estrutura *sandwich* é praticamente proporcional com o aumento da espessura do núcleo. Um incremento de 2mm de espessura provoca um aumento de cerca de 6 - 5,5 % na força limite elástico. Quanto à componente plástica podíamos concluir que o aumento da espessura provocaria um aumento da rigidez da estrutura, no entanto, devido a problemas associados à separação de camadas não iremos avaliar a sua evolução.

A principal conclusão que podemos tirar com estes resultados está relacionado com a contribuição da espuma metálica na estrutura *sandwich*. Para espessuras pequenas (espessura mínima destes painéis é de cerca de 8mm) um pequeno aumento da espessura pode provocar um grande aumento da rigidez da mesma (15 - 20%). Associado ao aumento da espessura temos o peso da estrutura, que neste caso, como tratamos de um material com uma densidade relativa muito baixa (9%), é muito pequena, cerca de 6% por cada 2mm de espessura adicional. Também chegamos à conclusão que para espessuras superiores a 14mm a contribuição do aumento da mesma não é tão significativo em relação à rigidez da estrutura. Isto para além dos problemas associados à dificuldade de conformação plástica para espessuras maiores.

## REFERÊNCIAS

- [1] Mata, Hélder T C, “Estudo de Estruturas Sandwich Hidroformadas Constituídas por Núcleo de Espumas Metálicas”, Tese de Doutoramento, FEUP, 2014, Porto
- [2] Deshpande, V. S., and N. A. Fleck, Isotropic Constitutive Model for Metallic Foams; Journal of the Mechanics and Physics of Solids, pp. 1253–1276, 2000.

[3] Mata, H. et al., "Caracterização Mecânica dos Materiais que Constituem Estruturas Sandwich com núcleo de espuma metálica", Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol.17, N.º2, pp. 125-137, 2013



## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os objectivos desta tese passavam por analisar a influência da espessura da estrutura *sandwich*, com núcleo em espuma metálica, em função do aumento da rigidez da estrutura. As simulações numéricas efectuadas permitiram estabelecer linhas de investigação relacionadas com o objectivo desta tese.

Através de um acréscimo mínimo de peso podemos obter uma estrutura bastante mais rígida, consoante a solicitação pretendida. Para além do aumento de rigidez da estrutura, o aumento da espessura da espuma metálica provoca um melhoramento das propriedades da estrutura que têm origem na espuma metálica. O aumento da rigidez específica da estrutura provoca ainda um aumento da capacidade de absorção de energia e de vibrações na estrutura bem como obteremos uma maior integridade estrutural.

### 5.1 CONCLUSÕES

Entre as conclusões mais pertinentes que retiramos desta tese, podemos começar por especificar as origens dessas mesmas conclusões. Uma estrutura *sandwich* apresenta um comportamento típico. Sendo os seus constituintes responsáveis por determinadas propriedades da estrutura. Uma estrutura *sandwich* tem como constituintes as faces, o núcleo e um adesivo.

Genéricamente, as faces tem o papel de oferecer a resistência à flexão da estrutura. Esta característica é fundamentalmente provocada pelo facto de, quando uma das faces se encontra à tracção a face oposta estará à compressão. Este fenómeno é a causa principal da resistência à flexão destas estruturas *sandwich*. Alterando a espessura das faces, o afastamento entre elas, a orientação dos grãos da chapa (iso/anisotropia) ou a origem do material das mesmas podemos alterar o comportamento mecânico à flexão de toda a estrutura. No desenvolvimento desta tese, o afastamento das faces vem forçosamente da espessura do núcleo. Um aumento da espessura nuclear provocará obrigatoriamente um afastamento maior entre as faces. Como o principal objectivo desta tese passa por estudar a influência do núcleo em espuma metálica, através da variação de espessura do mesmo, podemos desde já concluir que um aumento da espessura nuclear provocará obrigatoriamente um aumento de resistência à flexão da estrutura, provocado pelo afastamento das faces. Esta análise pode ser feita tendo em atenção que todas as outras variáveis

nas simulações numéricas se mantém iguais, alterando apenas a espessura do núcleo do painel. Como já referimos anteriormente neste parágrafo, poderíamos também aumentar a resistência à flexão desta estrutura alterando outras características que não o afastamento entre as faces. De notar que a orientação dos grãos das faces é também desprezável, considerando o material como isotrópico. No entanto, o objectivo desta tese não incide nessas variáveis, pelo que as desprezamos.

Na realização desta tese, o adesivo é apenas referido, não sendo caracterizado nas simulações numéricas. No entanto, o papel de um adesivo numa estrutura *sandwich* é de grande importância, sendo responsável pela integridade da estrutura e pela absorção de certas tensões de corte quando o painel é fleccionado. A escolha adequada de um adesivo é, para uma dada aplicação, uma consideração importantíssima, visto ser um dos principais responsáveis pela integridade da estrutura *sandwich*. Na seleção do adesivo para estas estruturas é necessário ter em atenção a gama de temperaturas de serviço, os materiais a colar e a necessidade ou não de conformar a estrutura plásticamente. Como o objectivo desta tese passa por estudar a influência da espessura nuclear, o comportamento do adesivo é desprezado em todas as simulações efectuadas, sendo utilizado um comportamento solidário entre o núcleo e as faces (comando *\*Tie* do 'Abaqus'). Contudo ficou aqui referido o papel e as variáveis deste constituinte. Claramente que o desprezo deste constituinte provocou erros associados. No entanto, esses erros são desprezáveis visto que os resultados pretendidos não são influenciados pela separação de camadas, que por sua vez é provocada pela má caracterização/seleção do adesivo.

Relativamente ao núcleo, este tem como principal papel absorção das tensões de corte provenientes da deformação da estrutura *sandwich*. Diferentes materiais escolhidos para o núcleo promovem diferentes propriedades. No caso em estudo, espuma metálica, a estrutura apresentará algumas das propriedades da espuma metálica. A espuma metálica é caracterizada por ser um material com alta absorção de energia e vibrações, bom isolador térmico e sonoro bem como apresenta uma baixa densidade relativa, o que torna este material ideal para aplicações na indústria dos transportes (eficiência sonora, térmica e energética bem como por motivos de segurança). O objectivo desta tese passa por estudar o comportamento do núcleo numa estrutura *sandwich*. Por esse motivo é relevante esta caracterização do material utilizado nestas estruturas. A espuma metálica já havia sido testado anteriormente pela Faculdade de Engenharia do Porto, com ensaios de compressão, pelo que as propriedades utilizadas na realização das simulações numéricas serão as mesmas. O material é classificado como isotrópico, uma simplificação perfei-

tamente válida, visto que idealmente os poros da espuma estariam igualmente espessados. Na realidade isto não acontece mas uma aproximação à isotropia não acarretará erros significativos nos resultados.

Avaliando os resultados obtidos nas simulações numéricas dos ensaios de flexão, podemos tirar uma conclusão que à partida era esperada. Tal como vimos a referir nos últimos parágrafos, a modificação de uma das características de cada constituinte de uma estrutura *sandwich* provoca uma alteração nas propriedades da mesma. O nosso estudo incide apenas na variação da espessura do núcleo em espuma metálica. Então, à partida, será claro que todas as propriedades relacionadas com a espuma metálica serão melhoradas com o aumento da espessura nuclear. No entanto o principal factor que promove o aumento de rigidez e resistência à flexão da estrutura é o afastamento das faces, provocada pelo aumento da espessura do núcleo. É de especial interesse notar que a resistência à flexão e rigidez da estrutura aumenta significativamente para menores espessuras. Isto é, para espessuras nucleares pequenas (mínimo de 8mm), um pequeno aumento da mesma provocará um significativo aumento de resistência à flexão e rigidez (15 a 20%). E, por sua vez, para espessuras do núcleo maiores (14mm ou mais) um aumento de igual escala não será tão ‘visível’ ou vantajoso.

Podemos então concluir que a espessura do núcleo numa estrutura *sandwich* tem um interesse relevante. Trabalhando com espessuras mínimas podemos alterar as propriedades da estrutura com uma contrapartida praticamente insignificante, um aumento de peso reduzido. Para além do melhoramento na rigidez da estrutura, um pequeno aumento da espessura nuclear promove melhores propriedades térmicas e acústicas.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Após a caracterização da influência da espessura nuclear na rigidez da estrutura *sandwich* com núcleo em espuma metálica abre várias linhas de investigação interessantes. Uma análise para espessuras maiores, ou com espessura das faces diferente seria o passo mais lógico a seguir após esta tese. No entanto, o sugerido pelo autor da tese seria comprovar estes resultados com recurso aos ensaios de flexão simulados.

Para além do referido, um trabalho que seria um bom complemento ao realizado nesta tese, seria utilizar uma simulação dos ensaios mais aproximada, com adesivos diferentes e caracterizados pelas suas propriedades. Seria também interessante simular novamente os ensaios com diferentes tipos de elementos e verificar a influência dos mesmos nos resultados. Uma malha mais pequena proporcionaria resultados mais precisos também. Poderia também ser interessante estudar a influência do comprimento dos provetes nos resultados das simulações.

Outras linhas de investigação possíveis seria estudar a influência da espessura das faces ou estudar a influência da espessura nuclear para um material diferente e comparar com espuma metálica utilizada nesta tese. Estes são apenas algumas linha de investigação sugeridas. Contudo, este tipo de estruturas estão ainda a ser alvo de estudo, e qualquer contributo no melhor conhecimento das suas características será relevante para o futuro.